

# **Keskeytymättömän sähkönsyötön laitteen kunnonvalvonta**

**Niko Luostarinen**

## **Sähkötekniikan korkeakoulu**

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi  
diplomi-insinöörin tutkintoa varten Espoossa 29.07.2019.

## **Työn valvoja**

Professori Jorma Kyyrä

## **Työn ohjaaja**

Diplomi-insinööri Jari Uusitalo



**Aalto-yliopisto**  
**Sähkötekniikan**  
**korkeakoulu**

---

**Tekijä** Niko Luostarinen

---

**Työn nimi** Keskeytymättömän sähkönsyötön laitteen kunnonvalvonta

---

**Koulutusohjelma** Automation and Electrical Engineering

---

**Pääaine** Electrical Power and Energy Engineering      **Pääaineen koodi** ELEC3024

---

**Työn valvoja** Professori Jorma Kyyrä

---

**Työn ohjaaja** Diplomi-insinööri Jari Uusitalo

---

**Päivämäärä** 29.07.2019

**Sivumäärä** 59

**Kieli** Suomi

---

**Tiivistelmä**

Kunterustainen kunnossapito (CBM) on noussut mielenkiintoiseksi vaihtoehdoksi perinteisten kunnossapitostrategioiden rinnalle keskeytymättömän sähkönsyötön (UPS) laitteen kunnossapidossa, sillä se voi madaltaa kunnossapitokuluja luotettavuuden kärsimättä. Tämän diplomityön tarkoituksena on siis selvittää kirjallisuuskatsauksena kuinka CBM:ää tulisi käytännössä toteuttaa kunnonvalvonnan (CM) avulla UPS-laitteessa.

Työssä selvitetään kunnossapidon ja kunnonvalvonnan perusteet, sekä tutustutaan kaksoismuunnos-UPS-laitteeseen ja sen komponentteihin, jotta kunnonvalvonnan kannalta kiinnostavimmat komponentit löydetään. Kondensaattorit todetaan kaikkein kiinnostavimmiksi komponenteiksi, joten työssä perehdytään niiden toimintaan, ominaisuuksiin ja vikaantumiseen sopivien mittausparametrien löytämiseksi. Parametrien mitattuihin arvoihin voi vaikuttaa merkittävästi mittausolosuhteet, joten niiden vaikutuksia selvitetään työssä. Lopuksi työssä etsitään kirjallisuudesta relevantteja kunnonvalvontamenetelmiä, tutustutaan niiden toimintaperiaatteisiin sekä arvioidaan eri menetelmien hyötyjä ja haittoja.

Työn lopputuloksena löydetään käytännön toteutettavuuden kannalta kaikkein kiinnostavimmat kunnonvalvontamenetelmät kaksoismuunnos-UPS-laitteen välipiiri- ja AC-suodatuskondensaattoreille.

---

**Avainsanat** kunterustainen kunnossapito, CBM, kunnonvalvonta, CM, keskeytymätön, katkeamaton, häiriötön, sähkönsyöttö, UPS, kondensaattorit, elektrolyyttikondensaattori, filmikondensaattori

---

---

**Author** Niko Luostarinen

---

**Title** Condition Monitoring of Uninterruptible Power Supplies

---

**Degree programme** Automation and Electrical Engineering

---

**Major** Electrical Power and Energy Engineering **Code of major** ELEC3024

---

**Supervisor** Professor Jorma Kyrrä

---

**Advisor** Master of Science Jari Uusitalo

---

**Date** 29.07.2019 **Number of pages** 59 **Language** Finnish

---

**Abstract**

Condition-based maintenance (CBM) has emerged as an interesting alternative to traditional maintenance strategies for uninterruptible power supplies (UPS), because CBM could potentially lower maintenance costs without risking reliability. Hence, the objective of this thesis is to investigate as a literary review how CBM should be implemented in practice with condition monitoring (CM) for UPS-devices.

In this thesis, the fundamentals of maintenance and condition monitoring are first examined. Next, double conversion UPS-devices and their components are familiarized with, so that the most interesting components for condition monitoring are recognized. During this thesis, capacitors are discovered as the most interesting components, thus their operation, properties and failures are examined. Appropriate condition monitoring parameters are selected, and the effects of measurement conditions are presented. Finally, relevant condition monitoring methods and their principles are investigated, and their advantages and disadvantages are evaluated.

As the result of this thesis, the most practical condition monitoring methods are discovered for the intermediate circuit and AC-filtering capacitors of double conversion UPS-devices.

---

**Keywords** condition-based maintenance, CBM, condition monitoring, CM, uninterruptible power supply, UPS, electrolytic, film, capacitors

---

# Sisältö

<b>Tiivistelmä</b>	<b>2</b>
<b>Tiivistelmä (englanniksi)</b>	<b>3</b>
<b>Sisältö</b>	<b>4</b>
<b>Symbolit ja lyhenteet</b>	<b>5</b>
<b>1 Johdanto</b>	<b>7</b>
<b>2 Järjestelmän kunnossapito</b>	<b>9</b>
2.1 Kunnossapitostrategiat . . . . .	9
2.2 Kuntooperustaisen kunnossapidon (CBM:n) toteuttaminen . . . . .	11
<b>3 Kaksoismuunnos-UPS</b>	<b>16</b>
3.1 Rakenne, toiminta ja komponentit . . . . .	16
3.2 Kunnonvalvonnan kannalta kiinnostavat komponentit . . . . .	18
3.2.1 Luotettavuustutkimukset . . . . .	18
3.2.2 Yritysten julkaisut . . . . .	21
3.2.3 Yritysten huolto-ohjelmat . . . . .	23
3.2.4 Yhteenveto ja pohdintoja . . . . .	24
<b>4 Kondensaattorit</b>	<b>26</b>
4.1 Alumiinielektrolyyttikondensaattori (AEC) . . . . .	30
4.1.1 Vikaantuminen . . . . .	32
4.1.2 UPS-laitteen kunnonvalvonnan kannalta kiinnostavat parametrit	33
4.1.3 Mittausolosuhteiden vaikutukset . . . . .	35
4.2 Filmikondensaattori . . . . .	37
4.2.1 Vikaantuminen . . . . .	39
4.2.2 UPS-laitteen kunnonvalvonnan kannalta kiinnostavat parametrit	43
4.2.3 Mittausolosuhteiden vaikutukset . . . . .	45
<b>5 Kondensaattorien kunnonvalvonta</b>	<b>48</b>
5.1 Välipiirikondensaattori . . . . .	50
5.2 AC-suodatuskondensaattori . . . . .	51
<b>6 Yhteenveto</b>	<b>53</b>
<b>Viitteet</b>	<b>55</b>

# Symbolit ja lyhenteet

## Symbolit

$C$	kapasitanssi
$Q$	sähkövaraus
$\epsilon_0$	tyhjiön permittiivisyys
$\epsilon_r$	suhteellinen permittiivisyys
$A$	pinta-ala
$d$	etäisyys
$i$	vaihtovirta
$u$	vaihtojännite
$t$	aika
$Z$	impedanssi
$j$	imaginaariyksikkö
$\omega$	kulmataajuus
$L$	induktanssi
$R$	resistanssi
$\tan \delta$	häviökerroin

## Lyhenteet (suluissa englanniksi)

AC	vaihtovirta
AEC	alumiinielektrolyyttikondensaattori (Aluminium Electrolytic Capacitor)
CM	kunnonvalvonta (Condition Monitoring)
CBM	kunterustainen kunnossapito (Condition-Based Maintenance)
DC	tasavirta
DF	häviökerroin (Dissipation Factor)
EMI	sähkömagneettinen häiriö tai häiriintyminen (Electromagnetic Interference)
EOL	eliniän päättyminen (End-Of-Life)
ESL	ekvivalentti sarjainduktanssi
ESR	ekvivalentti sarjaresistanssi
FFT	nopea Fourier-muunnos (Fast Fourier Transform)
IGBT	eristehilainen bipolaaritransistori (Insulated Gate Bipolar Transistor)
IR	eristeresistanssi (Insulation Resistance)
MOSFET	metallioksidipuolijohdekanavatransistori (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor)
MOV	metallioksidivaristori (Metal-Oxide Varistor)
MPPF	metalloitu polypropeenifilmi
PEN	polyeteeninaftalaatti
PET	polyeteenitereftalaatti
PP	polypropeeni
PPS	polyfenyleenisulfidi (PolyPhenylene Sulfide)
PWM	pulssinleveysmodulaatio (Pulse Width Modulation)
RUL	jäljellä oleva elinikä (Remaining Useful Life)
SCR	tyristori (Silicon Controlled Rectifier)
PHM	prognostiikka ja kunnonhallinta (Prognostics and Health Management)
UPS	keskeytymätön sähkönsyöttö (Uninterruptible Power Supply)

# 1 Johdanto

Kunterustainen kunnossapito (CBM – Condition-Based Maintenance) on noussut mielenkiintoiseksi vaihtoehdoksi perinteisten kunnossapitostrategioiden rinnalle. Perinteisesti järjestelmän toimintakykyä on ylläpidetty joko korjaavalla tai ennakoivalla kunnossapidolla, joilla on kuitenkin omat heikkoutensa. CBM yhdistää perinteisten kunnossapitostrategioiden vahvat puolet, jolloin järjestelmän kunnossapito voidaan mahdollisesti toteuttaa aiempaa edullisemmin ja luotettavammin. CBM onkin erityisen houkutteleva kunnossapitostrategia keskeyttämättömän sähkönsyötön (UPS – Uninterruptible Power Supply) laitteille, joiden pääasiallinen tehtävä on suojata ja ylläpitää sähköisiä kuormia sähköverkon häiriötilanteissa.

Kunterustaisen kunnossapidon toteuttaminen edellyttää järjestelmän kunnan tuntemista, jotta tarvittavat kunnossapitotoimenpiteet voidaan ajoittaa sopivasti ennen järjestelmän vaaditun toimintakyvyn menettämistä. Kunnanvalvonnan (CM – Condition Monitoring) avulla järjestelmän kuntoa voidaan seurata ja sen kehittymistä tulevaisuudessa kyetään arvioimaan, eli CM mahdollistaa CBM:n toteuttamisen. Kunnanvalvonnessa järjestelmästä kerätään erilaisten kunnanvalvonnan menetelmien avulla dataa, josta järjestelmän kuntoa ja sen kehittymistä kyetään arvioimaan.

CBM:ää ja CM:ää on tutkittu kirjallisuudessa tyypillisesti joko abstraktilla järjestelmätasolla tai erilaisten suuntaajajärjestelmien yksittäisille komponenteille, mutta ei kokonaisuutena UPS-laitteille. Tämän diplomityön päätavoitteena on siis selvittää kirjallisuuskatsauksena kuinka kunnanvalvontaa tulisi käytännössä toteuttaa, jotta kunterustaista kunnossapitoa voitaisiin tehokkaasti hyödyntää UPS-laitteelle. Käytännössä tämä tarkoittaa soveltuvien kunnanvalvontamenetelmien selvittämistä ja niiden vertailua parhaan menetelmän löytämiseksi sopiville UPS-laitteen komponenteille. Diplomityön aikana ei toteuteta kunnanvalvontaa käytännössä laajan kokonaisuuden vuoksi, vaan työssä pyritään tuottamaan vahva tietopohja, jonka avulla kunnanvalvonnan toteuttaminen UPS-laitteelle olisi mahdollisimman suoraviivaista työn jälkeen.

Työn päätavoitteen saavuttaminen edellyttää kunnossapidon ja kunnanvalvonnan perusteiden ymmärtämistä, joihin siis tutustutaan luvussa 2. Toimivan kunnanvalvonnan toteuttaminen laitteelle taas edellyttää ymmärrystä sen funktiosta, toiminnasta ja komponenteista, joten luvussa 3 tutustutaan UPS-laitteisiin, ja pyritään selvittämään mille komponenteille kunnanvalvonnan toteuttaminen on erityisen hyödyllistä. Työ rajataan käsittelemään vain kaksoismuunnos-UPS-laitteita, jotka ovat yksi yleisimmistä UPS-laitetyypeistä.

Diplomityön rajallisessa ajassa voidaan tutustua tarkemmin vain muutaman komponentin kunnanvalvontamenetelmiin, joten työssä keskitytään erityisesti kondensaattoreihin, jotka todetaan luvussa 3.2.4 kaikkein kiinnostavimmiksi osiksi UPS-laitteen kunnanvalvonnessa. Työn luvussa 4 tutustutaan siis kondensaattorien toimintaan, ominaisuuksiin ja vikaantumiseen yksityiskohtaisesti, jotta niiden pääasialliset vikamekanismit UPS-laitteessa ymmärretään ja löydetään kunnanvalvontaan soveltuvat mittaussparametrit. Mittausolosuhteet voivat vaikuttaa merkittävästi parametrien mittattuihin arvoihin, joten myös niiden vaikutuksia selvitetään työssä.

Lopulta luvussa 5 etsitään kirjallisuudesta relevantteja kunnanvalvontamene-

telmiä, esitetään niiden toimintaperiaatteet lyhyesti sekä arvioidaan menetelmien hyötyjä ja haittoja. Diplomityön päätavoitteen mukaisesti eri menetelmiä vertaillaan niiden käytännön toteutettavuuden kannalta ja lopuksi suositellaan kaikkein parasta menetelmää. Viimeiseksi luvussa 6 tehdään yhteenveto työn tuloksista.



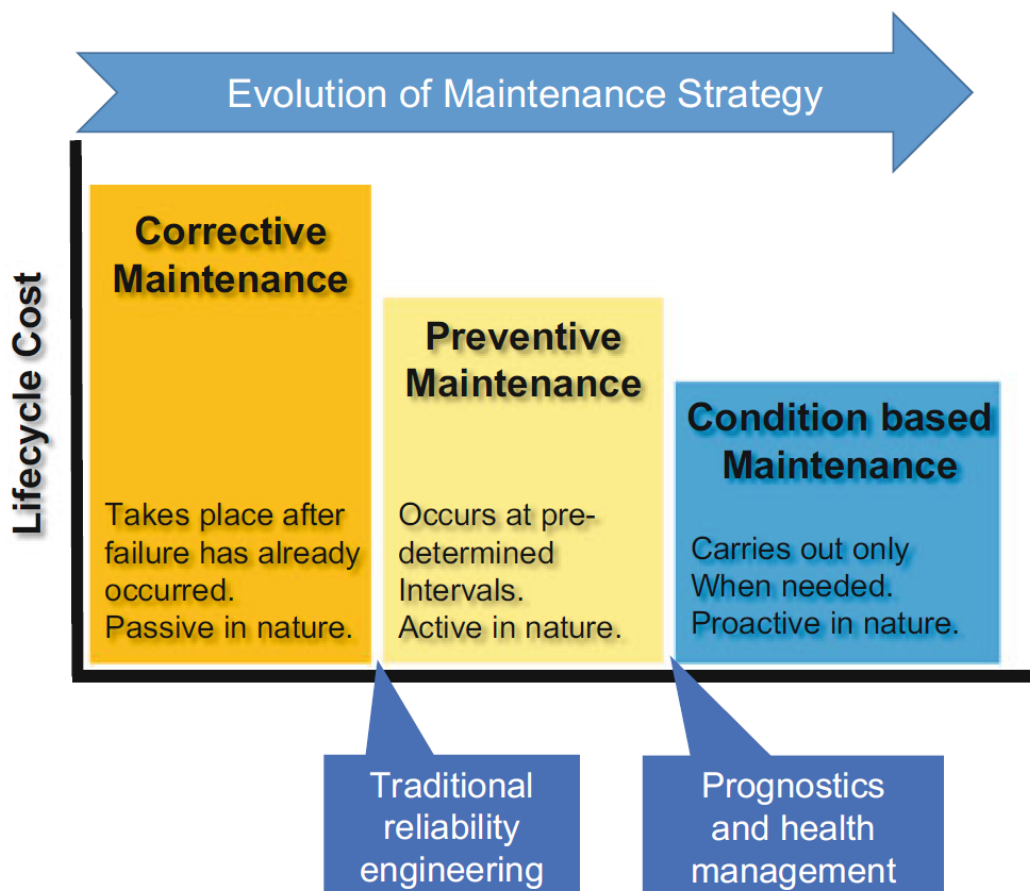
## 2 Järjestelmän kunnossapito

Jokaisen järjestelmän tai laitteen toimintakyky heikkenee ajan myötä sen ikään-  
tyessä erilaisten rasitusten vaikutuksesta. Tästä syystä järjestelmiä tulee huoltaa  
niiden toimintakyvyn ylläpitämiseksi. Perinteisesti toimintakykyä on ylläpidetty joko  
korjaavien tai ennalta määrättyjen huoltojen avulla, mutta potentiaalisesti vaihtoeht-  
doksi on muodostunut kunterustainen kunnossapito (CBM – Condition-Based  
Maintenance).

Tässä luvussa käsitellään yleisellä tasolla (elektronisen) järjestelmän kunnossapi-  
tostrategioita sekä erityisesti kunterustaista kunnossapitoa ja sen toteuttamista  
kunnanvalvonnan avulla.

### 2.1 Kunnossapitostrategiat

Kunnossapidolla tai huollolla tarkoitetaan kaikkia niitä toimenpiteitä, joiden tar-  
koituksena on pitää laite tai järjestelmä halutussa toimintakunnossa tai palauttaa  
se haluttuun toimintakuntoon [1]. Kunnossapitostrategiat ja niiden kehityskulku  
esitetään kuvassa 1, jonka mukaan kunnossapito voidaan jakaa korjaavaan, ennal-  
taehkäisevään ja kunterustaiseen kunnossapitoon.

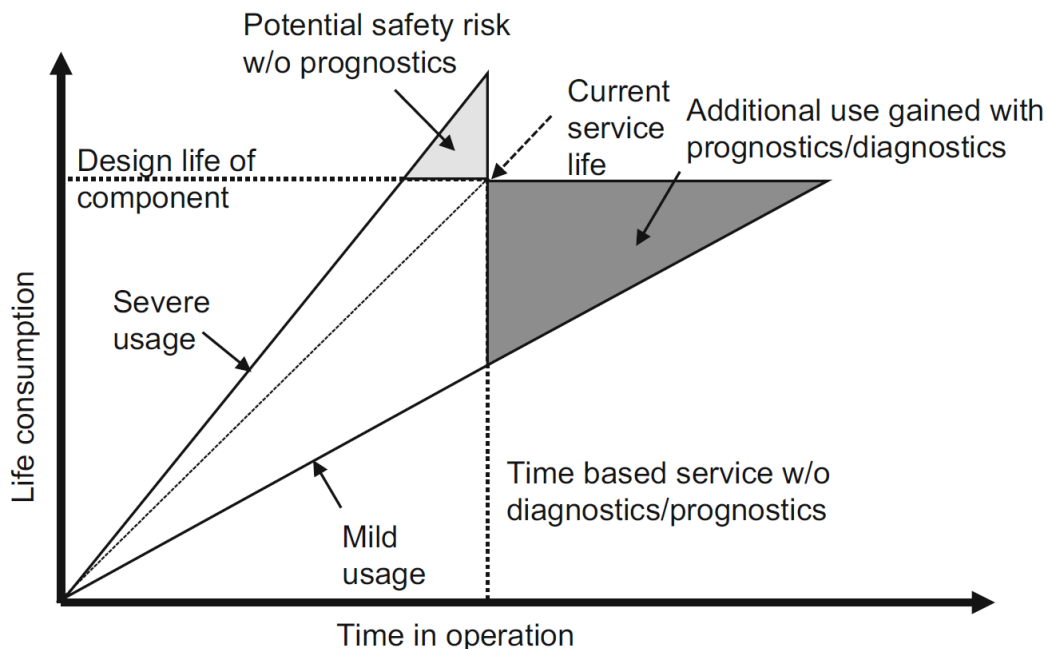


Kuva 1: Kunnossapitostrategiat ja niiden kehittyminen. [2]

Korjaavassa kunnossapidossa huoltotoimenpiteitä suoritetaan vasta, kun järjestelmä tai sen osa on jo vikaantunut [1, 2]. Järjestelmän käytettävyyttä on heikko, huoltoaika pitkä ja kulut suuret, koska vikaantumisaikankohdasta ei voida ennakoita ja kunnossapitoon ei voida varautua. Toisaalta varaosia tarvitaan vähän, koska vain oikeasti vikaantuneet osat korvataan. [2]

Ehkäisevässä kunnossapidossa huoltotoimenpiteitä suoritetaan aikaperusteisesti tietyin määriä joko jonkin muun säännön mukaan, ja toimenpiteiden tarkoituksena on ehkäistä vikojen syntymistä. Sopiva huoltoväli voidaan määrittää esimerkiksi luotettavuusennusteilla tai kentältä kerätyillä tiedoilla, mutta se ei perustu järjestelmän todelliseen toimintakuntoon. Strategia on kustannustehokas, jos järjestelmän osista valtaosan odotetaan vikaantuvan samanaikaisesti. Toisaalta, jos vain pieni osa järjestelmän komponenteista vikaantuu, niin strategia voi olla kallis. [1, 2]

Kunterustaisen kunnossapidon (CBM - Condition-Based Maintenance) ja siihen läheisesti liittyvien käsitteiden määritelmät vaihtelevat kirjallisuudessa. Yleisesti [1, 2, 3, 4] CBM:llä tarkoitetaan laitteen tai järjestelmän huoltotoimenpiteiden suorittamista ennen sen vikaantumista perustuen sen nykyiseen tai ennustettuun toimintakuntoon. Tämän yleisen määritelmän perusteella CBM voidaan tulkita yhdistelmäksi korjaavaa ja ennaltaehkäisevää kunnossapitoa, koska huoltotoimenpiteitä suoritetaan järjestelmän todellisen kunnan mukaan, kuten korjaavassa kunnossapidossa ja ennen järjestelmän lamaannuttavan vian syntymistä kuten ehkäisevässä kunnossapidossa. CBM on erityisen houkutteleva huoltostrategia monimutkaisissa ja korkean luotettavuuden järjestelmissä, sillä CBM:n avulla huoltokuluja voidaan alentaa luotettavuuden kärsimättä. [2] Tätä hyötyä havainnollistetaan kuvassa 2.



Kuva 2: CBM pidentää komponenttien käyttökelpoista elinikää vaihtelevissa olosuhteissa vaarantamatta luotettavuutta. [2]

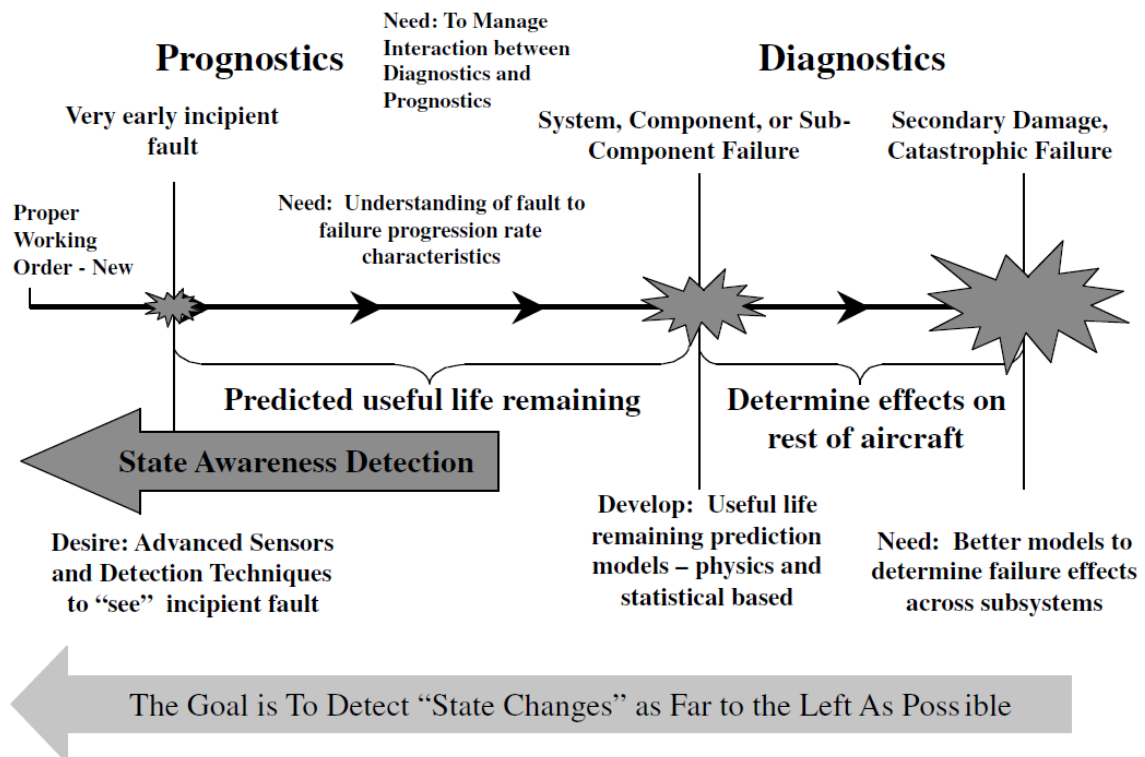
Keskeytymättömän sähkönsyöton laitteet (UPS – Uninterruptible Power Supply), joita tarkastellaan lähemmin luvussa 3, pyrkivät nostamaan järjestelmän käytettävyyttä suojaamalla ja ylläpitämällä kuormia syöttävän verkon häiriötilanteissa. UPS-laitteiden valmistajista esimerkiksi Eaton hyödyntää [5, 6, 7, 8] ehkäisevää kunnossapitoa, jolloin suojatun järjestelmän käytettävyys ei vaarannu UPS-laitteen yllättävän vikaantumisen johdosta. Toisaalta UPS-laitteen sisältämien komponenttien eliniät voivat vaihdella merkittävästi (luku 3.2), joten ehkäisevä kunnossapito ei ole kustannustehokas strategia. Korjaavaa kunnossapitoa taas ei voida hyödyntää, koska UPS-laitteelta odotetaan korkeaa luotettavuutta ja käytettävyyttä laitteen funktion takia. CBM on siis erityisen houkutteleva kunnossapitostrategia UPS-laitteille, sillä sen avulla huoltokuluja voidaan alentaa luotettavuuden kärsimättä.

## 2.2 Kunterustaisen kunnossapidon (CBM:n) toteuttaminen

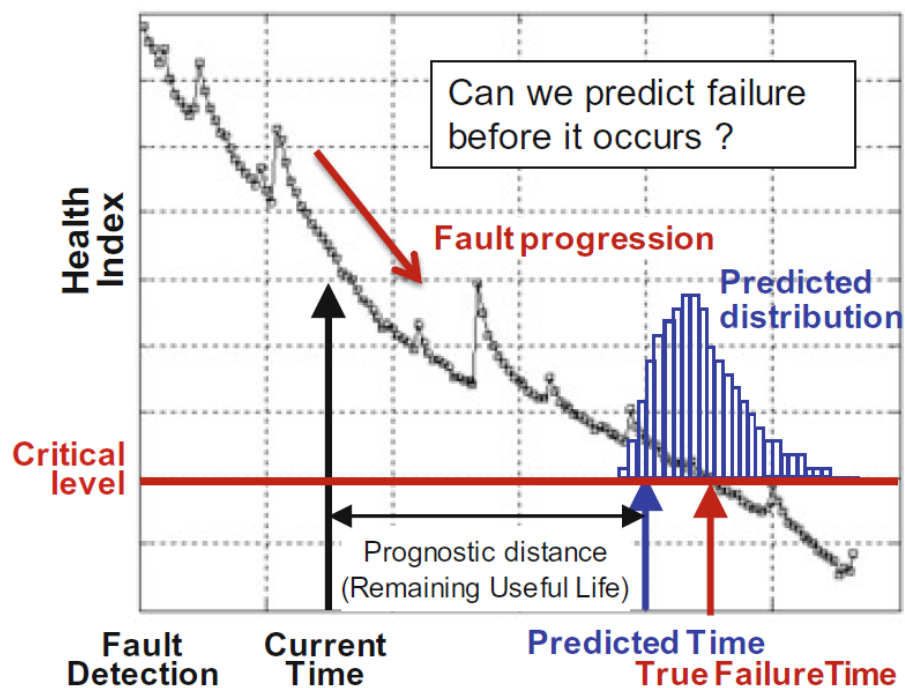
On esitetty [3], että monimutkaisten järjestelmien kunnossapidossa oli tapahtumassa perustavanlaatuinen ajattelutavan muutos jo vuonna 2006, ja tätä ajavana tekijänä oli laitteiden älykäs diagnostiikka ja prognostiikka. Diagnostiikalla tarkoitetaan vian tai häiriön luonteen määrittämistä oireista, kun taas prognostiikalla viitataan tulevaisuuden tilan tai jäljellä olevan eliniän (RUL – Remaining Useful Life) ennustamiseen häiriöiden oireista. Diagnostiksi kutsutaan järjestelmän viasta tai häiriöstä tehtyjä johtopäätöksiä, jotka kuvaavat ongelman tyyppiä, tilannetta ja laajuutta. Prognosi on puolestaan arvio ajan hetkestä, jolloin järjestelmä lopulta vikaantuu, ja arvio lähestyvän vikamoodin riskistä. [4]

Kunnossapidon ajattelutavan muutosta kohti älykkäitä diagnooseja ja prognooseja havainnollistetaan [3] aikoinaan kaivoksissa käytetyillä kanarianlinnuilla, joiden avulla kaivoksen ilmanlaatua voidaan seurata. Vanhan mallin mukaan lintua valvotaan säännöllisesti ja sen kuolema tarkoittaa, että ilma kaivoksessa on pilaantunut. Uusi lähestymistapa tähän on, että linnun terveydentilaa valvotaan erilaisten mitausten ja arvioiden avulla, jolloin kaivoksen ilmanlaadun heikkenemisestä saadaan ennakkovaroitus huomattavasti aikaisemmin. Linnun terveydentilan mittauksista voidaan arvioida linnun nykyinen kunto sekä ennustaa jäljellä oleva aika ennen linnun kuolemista ja ilman pilaantumista, joten kaivoksen tyhjentämiseen voidaan varautua ajoissa. Kaivoksen ilmanlaadun kunnonhallinta voidaan siis toteuttaa aiempaa paremmin tekemällä diagnooseja ja prognooseja linnun terveydentilan mittauksista.

Käytettyjen valvontamenetelmien merkitystä järjestelmän kunnonhallinnassa voidaan edellisen esimerkin lisäksi havainnollistaa vian kehittymisen aikajanalla, joka esitetään kuvassa 3. Edistyneen kunnonvalvonnan (CM – Condition Monitoring) avulla tuleviin kunnossapitotoimenpiteisiin voidaan varautua ajoissa, sillä järjestelmän kunto on jatkuvasti tiedossa (diagnoosit), ja kunnon kehittyminen tai jäljellä oleva elinikä tunnetaan (prognoosit). Jos mitataan myöhään havaittavia muutoksia järjestelmässä eikä hyödynnetä prognostiikkaa, ennakkovaroitus tulevasta viasta saadaan vain juuri ennen vikaantumista ja mahdollisesti järjestelmän osakomponentin jo petettyä. Kunterustainen kunnossapito toimii sitä tehokkaammin mitä aikaisemmin tulevaa vikaa voidaan ennakoida järjestelmän kuntoa kuvaavista parametreista.



Kuva 3: Vian kehittymisen aikajana. [3]

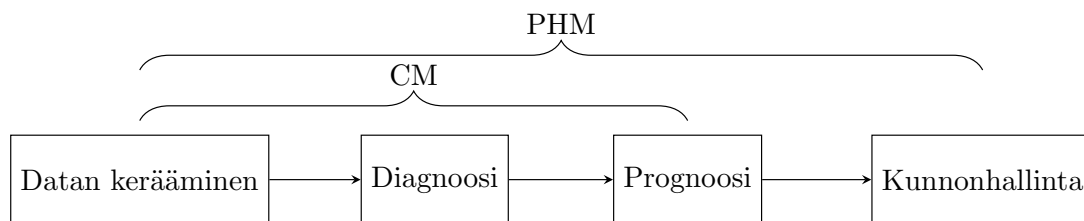


Kuva 4: [2] Järjestelmän kunnan kehittyminen.

Pohjimmiltaan CBM:n toteuttaminen perustuu siis kunnonvalvontaan, jolla tarkoitetaan sellaisen tiedon hankkimista ja prosessointia, joka kuvaa laitteen kuntoa ajan suhteen. Laitteen kunto heikkenee, kun vika aiheuttaa laitteen vaaditun toimintafunktion menettämisen, tai kun mahdollisesti vikaan johtava häiriö heikentää järjestelmää. [4] Kuvassa 4 havainnollistetaan kuinka järjestelmässä etenevä häiriö (englanniksi *fault*) heikentää laitteen kuntoa ajan myötä. Häiriön seurauksena laite saavuttaa lopulta kriittisen tason, jossa laite vikaantuu (englanniksi *failure*), eli se saavuttaa eliniän päättymisen (EOL – End-Of-Life) kriteerit. Kunnonvalvonnan tarkoituksena onkin käytännössä seurata laitteen kuntoa ilmaisevia parametreja ja arvioida niiden kehittymistä, jotta tarvittaviin kunnossapitotoimenpiteisiin voidaan ryhtyä laitteen ikääntyessä ennen vikaantumista.

Kunnonvalvonnan sijasta kirjallisuudessa saatetaan käyttää lähes synonyyminä termiä prognostiikka ja kunnonhallinta (PHM – Prognostics and Health Management), joka on kuitenkin heikosti tai vaihtelevasti määritelty käsite. Yleisesti [2, 3, 9] PHM:llä tarkoitetaan lähetymistapoja, jotka mahdollistavat järjestelmän tulevan kunnon arvioinnin ja sen kunnossapidon sopivan ajoittamisen. CM voidaankin siis tulkita PHM:n alakäsitteeksi, joka viittaa erityisesti tiedon hankkimiseen järjestelmästä, kun taas PHM viittaa enemmän kunnossapidon optimaaliseen ajoittamiseen.

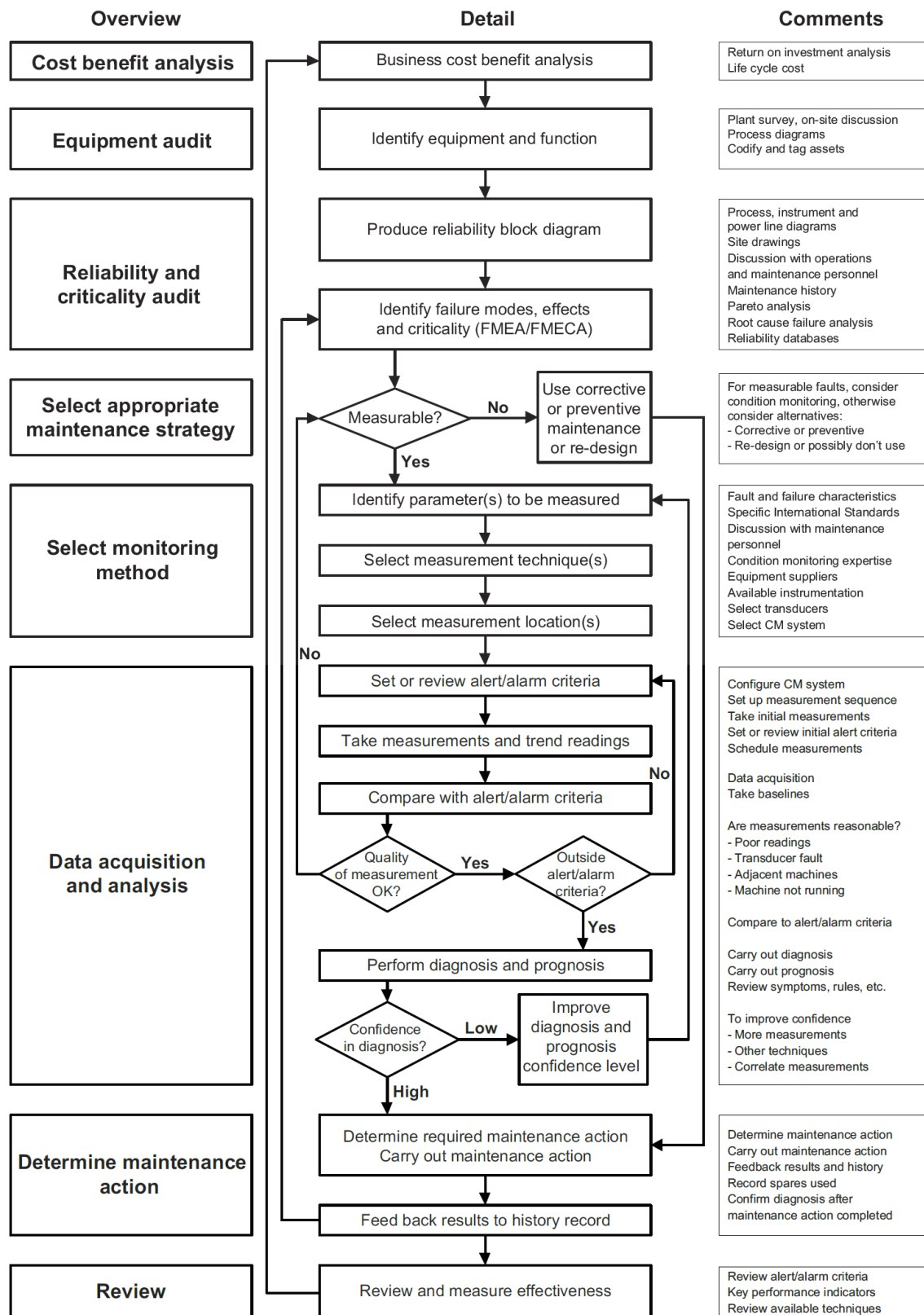
Kuvassa 5 esitetään tiivistetysti PHM:n ja kunnonvalvonnan vaiheet. Ensimmäisessä vaiheessa järjestelmästä kerätään ja prosessoidaan mittausdataa diagnoosin tuottamiseksi. Diagnoosissa datasta etsitään vikaan johtavia poikkeamia, selvitetään mikä komponentti on vikaantumassa ja kuinka vakava komponentin tila on. Kolmannessa vaiheessa tehdään prognoosi, eli arvioidaan minkä ajan kuluttua komponentti lopulta vikaantuu. Viimeisessä vaiheessa aikataulutetaan kunnossapito ja logistinen tuki optimaalisella tavalla. [2]



Kuva 5: PHM:n ja CM:n vaiheet. Muokattu lähteestä [2].

Tässä diplomityössä seurataan kuvassa 6 esitettyä prosessikaaviota sopivien kunnonvalvontamenetelmien löytämiseksi kaksoismuunnos-UPS-laitteelle, jotta sille voidaan tehokkaasti toteuttaa kuntoperustaista kunnossapitoa. Kunnonvalvonnan menetelmillä tarkoitetaan [1, 10] erilaisia mittaus- tai estimointitekniikoita, joilla kunnonvalvonnassa hyödynnettäviä parametreja voidaan havaita järjestelmästä. Prosessikaavio on osa standardia [10], jonka pyrkimyksenä on antaa yleisiä ohjeita kunnonvalvonnan toteuttamiseksi mekaanisille järjestelmille [4]. Valitettavasti tämän diplomityön aikana ei löydetty vastaavaa standardia sähkö- tai UPS-laitteille,

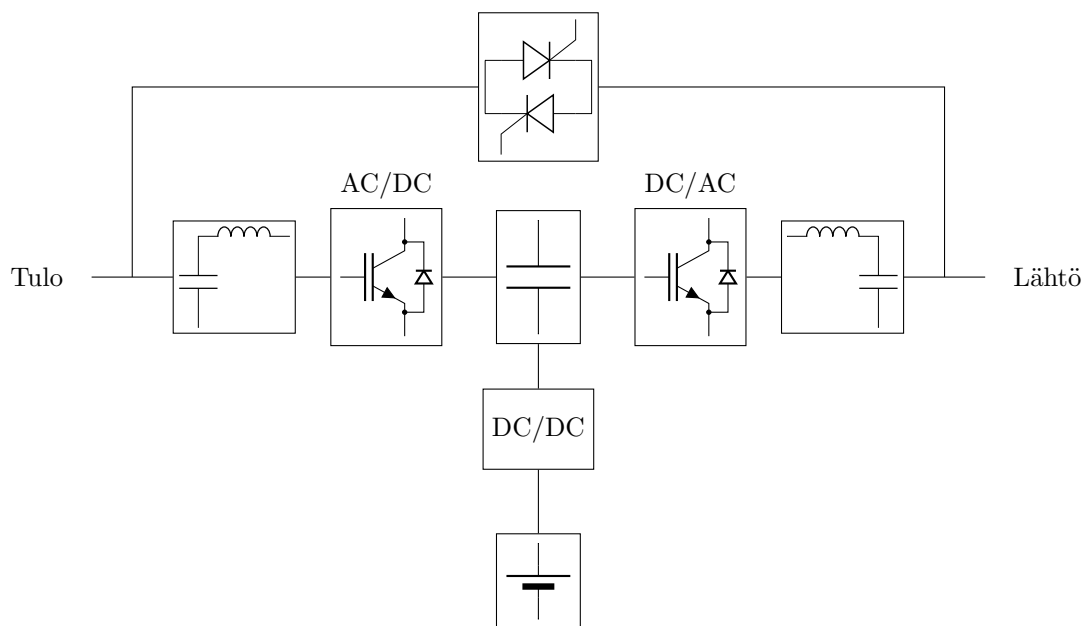
mutta yleisluontoisuutensa takia löydettyä standardia voidaan soveltaa hyvin myös sähkölaitteille. Koska tämän diplomityön aikana ei implementoida kunnonvalvontaa käytännössä, hyödynnetään prosessikaaviota vain soveltuvien osien (esimerkiksi mittausensorien sijoittaminen laitteeseen rajataan pois). CBM:n tarjoama mahdollinen taloudellinen hyödy todettiin jo luvussa [2.1](#), joten seuraava askel kaaviossa on tutustua tarkemmin UPS-laitteisiin.



Kuva 6: Kunnonvalvonnan toteuttamisen prosessikaavio. [10]

### 3 Kaksoismuunnos-UPS

Keskeytymättömän sähkönsyötön laitteen eli UPS-laitteen (Uninterruptible Power Supply) tehtävä on suojata ja ylläpitää kriittisiä kuormia niitä syöttävän sähköverkon häiriötilanteissa, sekä tarjota laadukasta sähköä kuormalle. Kaksoismuunnos-, tai toiselta nimeltään online-UPS-laitteet, ovat yksi yleisimmin käytetyistä UPS-laitetyypeistä. Tässä luvussa tutustutaan lyhyesti kaksoismuunnos-UPS:n rakenteeseen, toimintaan ja sen tyypillisesti sisältämiin komponentteihin. Luvussa tunnistetaan kaksoismuunnos-UPS-laitteen vikaherkimmät osat, jotta löydetään kiinnostavimmat komponentit kunnonvalvonnan ja kuntoperustaisen kunnossapidon näkökulmasta.



Kuva 7: Kaksoismuunnos-UPS:n lohkokaavio.

#### 3.1 Rakenne, toiminta ja komponentit

Tyypillisen kaksoismuuntavan UPS-laitteen periaatteellinen rakenne esitetään kuvassa 7. Kaksoismuunnos-UPS saa nimensä siitä, että kuormalle lähtöön syötetty sähkövirta muunnetaan kahdesti: ensin sähkö muunnetaan tuloverkon vaihtovirrasta tasavirraksi ja tasavirrasta takaisin vaihtovirraksi kuormalle tasa- ja vaihtosuuntaajien avulla. Tasa- ja vaihtosuuntaajien väliin niin kutsuttuun välipiiriin voidaan kytkeä erilaisia energiavarastoja, kuten akkuja, joiden avulla kuormalle pystytään syöttämään sähköä väliaikaisesti, vaikka tuloverkko ei olisikaan käytettävissä. Laitteen tulossa ja lähdössä voidaan käyttää erilaisia suodattimia esimerkiksi harmonisen särön ja sähkömagneettisten häiriöiden (EMI - Electromagnetic Interference) vähentämiseksi. Tyypillisesti kaksoismuunnos-UPS-laitteissa on myös staattinen ohituskytkin,



jolla sähköä voidaan syöttää suoraan tuloverkosta kuormaan suuntaajien ohi.

Tasa- ja vaihtosuuntaajissa käytetään yleisesti eristehilaisia bipolaaritransistoreita (IGBT – Insulated Gate Bipolar Transistor). IGBT:t voidaan koteloida useilla tavoilla, mutta ainakin suuremman teholuokan UPS-laitteissa hyödynnetään tyypillisesti IGBT-moduuleita, joihin on integroitu myös rinnankytketyt diodit. Transistorien päälle- ja poiskytkentään tarvitaan lisäksi hilaohjainpiirit.

Välipiirissä käytetään tyypillisesti alumiinielektrolyyttikondensaattoreita (AEC – Aluminium Electrolytic Capacitor) DC-suodatukseen ja energiavarastoina niiden korkean kapasitanssin takia. AEC:iden lisäksi voidaan hyödyntää filmikondensaattoreita nopeita kytkentäilmiöitä varten. Monitasosuuntaajissa voidaan käyttää tasapainotusvastuksia tasaamaan kondensaattorien varauksia. Välipiiriin kytketyssä kaksisuuntaisessa akuston DC/DC-muuttajassa käytetään tyypillisesti IGBT:itä tai metallioksidipuolijohdekanavatransistoreita (MOSFET – Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor), diodeja, keloja sekä kondensaattoreita. Akuston suuntaaja tarvitsee myös hilaohjaimet.

Ohituskytkimessä käytetään tyypillisesti tyristoreita (SCR – Silicon Controlled Rectifier) vastarinnankytkennässä. Periaatteessa yhtä triakkia voitaisiin käyttää kahden SCR:n sijasta, mutta käytännössä triakit ovat harvinaisia. Ohituskytkin vaatii hilaohjainpiirit.

Tulon ja lähdön AC-suodatuksessa käytetään tyypillisesti erilaisia filmikondensaattoreita ja keloja. Tulopuolen suodatuksessa käytetään erikoisluokiteltuja X- ja Y-kondensaattoreita vaiheesta vaiheeseen ja vaiheesta maahan kytkennöissä [11]. Erikoisluokitukset tarvitaan, sillä X-kondensaattorin vikaantuminen voi aiheuttaa suojauskomponenttien (sulakkeiden tai katkaisijoiden) avautumisen ja tulipalon riskin. Y-kondensaattorin vikaantuminen puolestaan voi aiheuttaa sähköiskun vaaran laitteen käyttäjälle. [12]

UPS-laitteen energiavarastona voidaan hyödyntää useita erilaisia ratkaisuja. Perinteisesti ja useiten käytetään lyijyakkuja, mutta esimerkiksi nikkelikadmium- ja litiumakut ovat myös mahdollisia. Jos tarvittava varakäyntiaika on lyhyt niin superkondensaattorit ovat eräs mielenkiintoinen vaihtoehto. Myös esimerkiksi vauhtipyöriä on ehdotettu [13], mutta käytännössä ne ovat harvinaisia.

UPS-laitteen komponentit voivat toimia vain tietyllä lämpötila-alueella ja tarvitsevat siis lämmöntuoton vuoksi jäähdytystä. Erilaisten jäähdytyslevyjen lisäksi tehokomponentit tarvitsevat usein aktiivijäähdytystä eli jäähdytyspuhaltimia lämmön siirtämiseksi pois laitteesta. Aktiivijäähdytettyjä komponentteja voivat olla tyypillisesti suuntaajien puolijohteet, ohituskytkin, välipiirikondensaattorit sekä AC-suodatuskondensaattorit ja -kelat. Aktiivijäähdytystä käytettäessä hyödynnetään usein myös ilmansuodattimia, jotta ilmassa oleva pöly ei kertyisi laitteen sisälle ilmavirran mukana.

UPS-laitteessa käytetään erilaisia suojaus- ja kytkinkomponentteja laitteen komponenttien suojaamiseen ja laitteen ohjaukseen. Esimerkiksi tulopuolella käytetään sulakkeita ja katkaisijoita suojaamaan liialliselta virralta. Myös metallioksidivariatoreita (MOV) saatetaan käyttää suojaamaan tasasuuntaajaa tai tulosuodatinta verkon transienteilta. UPS-laitteen eri toimintatiloja taas voidaan ohjata sähköisesti releiden avulla tai mekaanisesti katkaisijoilla.

UPS-laitteen toimintaa säätelee ohjausjärjestelmä, joka esimerkiksi pitää laitteen lähtöjännitteen amplitudin ja taajuuden halutunlaisena. Ohjausjärjestelmään sisältyy useita komponentteja kuten erilaiset sensorit, analogi-digitaalimuuntimet, signaaliprosessori ja laitteen tietoliikenneväylät sekä käyttöliittymä. UPS-laitteessa mitataan tyypillisesti monia parametreja kuten tulo- ja lähtövirtoja sekä -jännitteitä, välipiirin jännitettä, akuston jännitettä ja virtaa sekä eri lämpötiloja.

Vaikka UPS-laite on itsessään virtalähde niin se tarvitsee omaan toimintaansa myös apuvirtalähteitä. Apuvirtalähteitä tarvitaan muun muassa ohjausjärjestelmälle, hilaohjainpiireille ja jäähdytyspuhaltimille. Apuvirtalähteitä voidaan syöttää suoraan UPS-laitteen tulopuolelta sähköverkosta tai vaihtoehtoisesti välipiiristä.

## 3.2 Kunnonvalvonnan kannalta kiinnostavat komponentit

Tämän diplomityön puitteissa voidaan perehtyä tarkemmin vain muutaman UPS-laitteen osan kunnonvalvontaan. Tässä osassa siis pyritään löytämään komponentit, joille kunnonvalvonnan toteuttaminen vaikuttaa erityisen hyödylliseltä. Koska CBM:n ja siten CM:n pääasiallisena tarkoituksena on pienentää kunnossapitokuluja luotettavuuden kärsimättä, pitää kunnonvalvonnassa ottaa huomioon kaksi asiaa:

- Sen pitää maksaa itsensä takaisin laitteen elinkaaren aikana, jotta kunnossapidon kokonaiskulut pienenevät.
- Sen pitää toimia niin tarkasti ja luotettavasti, että se ei vaaranna laitteen luotettavuutta.

Kunnossapitokuluja voidaan pienentää joko harventamalla komponenttien vaihtoväliä tai laitteen huoltoväliä, tai nopeuttamalla huoltohenkilöstön toimenpiteitä huoltokäynnin yhteydessä. Käytännössä siis kunnonvalvonta kannattaa toteuttaa komponenteille, jotka vikaantuvat todennäköisesti muita komponentteja aikaisemmin, tai joiden eliniät vaihtelevat voimakkaasti, tai joiden kunnossapitotoimenpiteet vaativat paljon henkilöresursseja. Kunnonvalvonta on kannattavampaa toteuttaa kalliille komponenteille, sillä niillä on enemmän säästöpotentiaalia, ja tällöin myös kunnonvalvontalaitteisto voi olla kalliimpi. Kunnonvalvonnan toteuttaminen laitteessa jo olemassa olevilla resursseilla on erityisen houkuttelevaa, koska tällöin valvonnasta ei muodostu uuden laitteen valmistuksessa lisäkuluja, ja valvonta voidaan toteuttaa jo olemassa olevalle laitekannalle.

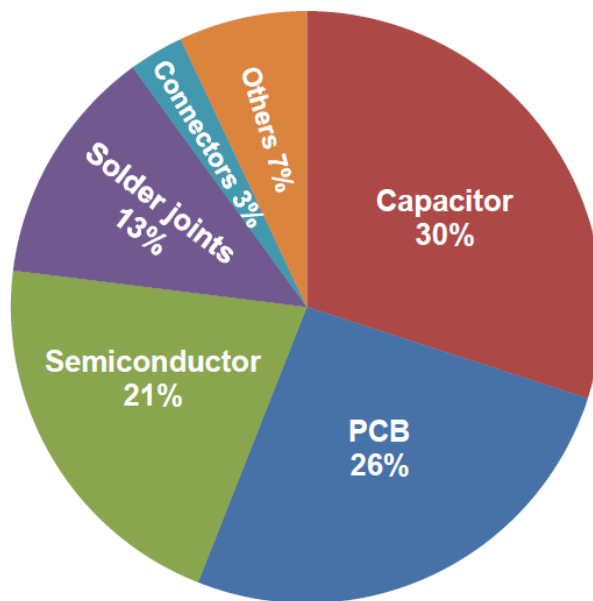
### 3.2.1 Luotettavuustutkimukset

Tehoelektroniikan suuntaajien luotettavuutta on selvitetty [14] laajalla subjektiivisella teollisuuden kyselytutkimuksella vuonna 2008. Valtaosa kyselyyn vastanneista 56:sta henkilöstä edustaa komponenttivalmistajia sekä moottorikäyttöjen ja sähköjakelun sovellusaloja. Vastaajien yritykset voivat edustaa useampaa sovellusalaa, joten eri sovellusalojen edustajia on enemmän kuin kyselyyn vastanneita henkilöitä – yhteensä 67 kappaletta. Komponenttivalmistajien edustajia ei erotella tarkemmin, mutta tutkimuksen tiivistelmässä kerrotaan, että kysely on tehty yhteistyössä muun

muassa puolijohdevalmistajien kanssa. Oletettavasti siis komponenttivalmistajilla tarkoitetaan nimenomaan puolijohdevalmistajia.

Suuntaajien vikaantumisten syiksi vastattiin ympäristöolosuhteet, transientit ja voimakas kuormittaminen tai ylikuorma lähes yhtäläisin luvuin noin 26 %:n kannatuksilla. Muihin syihin lukeutuvat komponenttien suunnittelu tai valmistus sekä teho- tai lämpösyklit, keräsivät yhteensä 10 % kannatuksen. Komponenttien suurimmaksi ulkoiseksi stressitekijäksi todettiin korkea ympäristön lämpötila 37 %:n kannatuksella, ja parhainpina luotettavuuden parantamisen metodeina pidettiin keinoja, joilla komponenttien jäähdytys tehostuu (jäähdytysaineen lisääminen 24:n ja suurempi jäähdytyslevy 18 %:n kannatuksilla). Muiksi merkittäviksi ulkoisiksi stressitekijöiksi mainitaan mekaaninen värinä 22:n ja kosteus 15 %:n kannatuksilla. Tutkimuksessa [14] huomautetaan, että kyselyssä ei tutkittu välipiirijännitteen aiheuttamaa jänniterasitusta, jolla on voimakas vaikutus tehokomponenttien luotettavuuteen.

Kyselyyn vastanneista 31 %:n mielestä suuntaajien heikoimmat komponentit ovat tehopuolijohteita. Seuraavaksi heikoimmiksi komponenteiksi todettiin 18 %:n osuudella kondensaattorit ja 15 %:n osuudella hilaohjaimet. Kyselyn tuloksen kalistuminen puolijohteita ja hilaohjaimia kohti ei ole yllättävää, koska suurin osa vastaajista edustaa puolijohdekomponenttien valmistajia. Tehopuolijohteet koettiin erityisen suureksi ongelmaksi komponenttivalmistajilla, moottorikäyttöissä, sekä sähkönjakelussa. Kondensaattoreita pidettiin erityisesti sähkönjakelussa heikkoina ja melko heikkoina kaikilla muilla sektoreilla paitsi autoteollisuudessa.



Kuva 8: Tehoelektroniikan järjestelmien vikojen juurisyyt [15]:n mukaan. [16]

Tutkimuksen tekijöiden [14] mukaan heidän tutkimuksensa vahvistaa ainakin osittain [15]:n esityksen (tulokset kuvassa 8), jonka mukaan kaikkein vikaherkimmät osat tehoelektroniikan järjestelmissä ovat kondensaattorit, piirilevyt ja puolijohteet. He kertovat [14], että [15]:n esitys käsittelee aihetta ainoastaan mikropiirien kokoluokassa piirilevyillä, kun taas heidän tutkimuksensa koskettaa tehoelektroniikan

suuntaajia yleisellä tasolla. Tutkimus [14] päättyi lopputulokseen, että puolijohteet ovat selvästi kaikkein vikaherkimpiä komponentteja tehoelektroniikan suuntaajissa.

Tehoelektronisten järjestelmien luotettavuutta on selvitetty [17] myös hiljattain vuonna 2018. Tässäkin tutkimuksessa hyödynnetään subjektiivista kyselyä, johon 51 alan yritysten asiantuntijaa on vastannut. Vastaajat saivat valita vapaasti itse mitä sovellusaloja he edustavat, joten eri sovellusalojen edustajia on kyselyssä enemmän kuin vastaajia – yhteensä 83 kappaletta. Tästä joukosta suurin osa edustaa sähköisten ajoneuvojen ja moottorikäyttöjen sovellusaloja. Tämän diplomityön kannalta erityisen oleellisia UPS-laitteiden ja teholähteiden asiantuntijoita on valitettavasti vain noin 8 % kaikkien sovellusalojen edustajista. UPS-laitteita ei ole luokiteltu kaikissa tutkimuksen kysymyksissä omaksi sovellusalaksi, joten tässä diplomityössä tutkimuksen tuloksilla viitataan sovellusalaan "kaikki"ellei muuta mainita. Numeeristen vastausten skaala vaihtelee yhdestä (ei kriittinen) kuuteen (erittäin kriittinen), ja lisäksi vastausten keskihajonta keskiarvon ympärillä on esitetty.

Kyselyn perusteella erilaiset lämpörasitukset koettiin erityisen merkittäviksi stressitekijöiksi suuntaajissa. Kaikkein suurimmiksi ongelmiksi koettiin komponenttien omat tehosykliä keskiarvolla noin 5,2 ja komponenttien häviöt keskiarvolla noin 4,9. Ulkoisista stressitekijöistä ympäristön lämpötila ja sen vaihtelu koettiin suureksi ongelmaksi keskiarvojen ollessa noin 4,5 ja 4,4. Vesi, mekaaninen rasitus, saasteet ja ulkoinen ylijännite koettiin melko kriittisiksi stressitekijöiksi kaikkien keskiarvojen ollessa noin 4. Erityisesti veden ja mekaanisen rasituksen vastauksissa on kuitenkin muita suurempi keskihajonta ja selkeitä eroja eri sovelluskohteiden välillä.

Tutkimuksen tekijöiden tekemän analyysin mukaan puolijohteet ja kondensaattorit ovat suurimmassa vaarassa vikaantua, ja niiden vikaantuminen on myös merkittävä riski järjestelmälle oikosulkuvikamoodien takia. Molempia komponentteja käytetään suuntaajien tehoasteessa ja niihin vaikuttavat jatkuvasti muun muassa lämpösykli ja jännitestressi. Tekijöiden mielestä tämä päätelmä näkyy myös asiantuntijoiden vastauksissa kyselyssä.

Kyselyyn vastanneiden mielestä tehopuolijohdemuodut, elektrolyyttikondensaattorit ja diskreetit tehopuolijohteet keskiarvoilla noin 4,8, 4,6 ja 4,3 ovat kaikkein vikaherkimpiä komponentteja tehoelektroniikassa. Tutkimuksen tekijät huomauttavat, että tulos on yhtenevä vuoden 2008 kyselyn [14] kanssa. Seuraavaksi herkimpiä osia ovat filmikondensaattorit keskiarvolla noin 3,9 sekä puolijohdeajurit, keraamiset kondensaattorit, suojauslaitteet, jäähdytysjärjestelmät, sähkömekaaniset komponentit ja apuvirtalähteet lähes yhtäläisillä noin 3,5 – 3,6 keskiarvoilla. Jäähdytysjärjestelmässä keskihajonta on selvästi suurin, kun taas filmi- ja keraamisissa kondensaattoreissa sekä sähkömekaanisissa komponenteissa on selviä eroja eri sovelluskohteiden välillä.

Kyselyssä asiantuntijoita pyydettiin nimeämään sanallisella vastauksella osat, joita olisi tärkeintä tutkia tulevaisuudessa luotettavuuden parantamiseksi tehoelektroniikan suuntaajissa. Asiantuntijoiden mielestä erityisesti tehopuolijohteita 40 %:n sekä kondensaattoreita 26 %:n kannatuksilla tulisi tutkia lisää. Muiden komponenttien osalta eniten kannatusta sai jäähdytysjärjestelmät ja puhaltimet 8 %:n kannatuksella. Kondensaattorityypeistä elektrolyytti- ja filmikondensaattorit mainittiin useimmin [17]. Joissakin vastauksissa ei nimetty tiettyä komponenttia, mutta todettiin, että ankarassa ympäristössä, esimerkiksi korkeassa lämpötilassa tai kosteudessa,

käytettäviä komponentteja tulisi tutkia jatkossa [17].

Tutkimuksessa pyydettiin asiantuntijoilta arviota siitä kuinka paljon asiakkaat ovat valmiita maksamaan ylimääräistä luotettavista tuotteista eri sovelluskohteissa. Tässä kysymyksessä UPS-laitteet ja teholähteet on luokiteltu omaksi ryhmäksi, ja vastausten keskiarvo tälle sovellukselle on noin 4,1. Muihin sovelluksiin verrattuna tulos on melko keskimääräinen. Maksuvalmiutta pidettiin suurimpana ilma-aluksissa, jossa keskiarvo on erittäin korkea noin 5,4. Vastausten keskihajonnat ovat suuria UPS-laitteiden osalta ja myös monissa muissa sovelluksissa.

UPS-laitteiden luotettavuuden maksuvalmiuden suuresta keskihajonnasta ja keskitasoisesta keskiarvosta voidaan tehdä erilaisia tulkintoja. Yksi selitys hajonnalle on, että kyselyn otos on liian pieni, jolloin muutaman poikkeavan mielipiteen takia keskihajonta kasvaa suureksi. Tätä tukee se, että vain seitsemän UPS-laitteiden ja teholähteiden asiantuntijaa osallistui kyselyyn. Toisaalta esimerkiksi sähköisten ajoneuvojen osalta keskihajonta on UPS-laitteiden kanssa samaa luokkaa, vaikka tämän alan asiantuntijoita osallistui kolminkertainen määrä eli 21 henkilöä. Toinen mahdollinen selitys hajonnalle on, että luotettavuuden merkitys vaihtelee selvästi sovellusalan sisällä. Tätä selitystä tukee se, että UPS-laitteita voidaan käyttää monissa erilaisissa sovelluksissa ja teholuokissa.

Vain keskimääräistä maksuvalmiuden keskiarvoa voisi selittää se, että UPS-laitteet ovat jo valmiiksi riittävän luotettavia niiden hintaan nähden. UPS-laitteet ovat kypsynyt teollisuuden ala ja niiden suunnittelussa tulisi kiinnittää erityistä huomiota luotettavuuteen niiden käyttötarkoituksen takia. Lähtötasoltaan UPS-laitteiden luotettavuutta voidaan siis pitää hyvänä, jolloin luotettavuuden nostamisesta ei välttämättä enää haluta maksaa ylimääräistä.

### 3.2.2 Yritysten julkaisut

Eatonin julkaisussa [5] vuodelta 2009 perustellaan ehkäisevän kunnossapidon tärkeyttä UPS-laitteen luotettavuuden parantamiseksi. Julkaisussa tunnistetaan useita UPS-laitteen vikaantumiseen johtavia syitä, joista yleisimmiksi listataan akusto, puhaltimet, välipiirikondensaattorit sekä tuloverkon transientit, jotka voivat vaurioittaa tulosuodatinta tai tasasuuntaajaa. Nämä syyt on listattu myös toisessa Eatonin julkaisussa [18] vuodelta 2010. Muiksi vikoja aiheuttaviksi osiksi listataan [5] ilmansuodattimet, apuvirtalähteet, tulosuodatin, kontaktorit, releet ja metallioksidivaristorit.

Schneider Electricin julkaisussa vuodelta 2014 [19] käsitellään yksivaihe-UPS-laitteiden kunnossapitoa ja elinikää. Siinä kerrotaan [19], että sen tulokset ovat sovellettavissa kaikkiin yksivaiheisiin UPS-laitteisiin, mutta laitteen topologia silti vaikuttaa laitteen vikaherkkyyteen. Yksivaihe-UPS-laitteet ovat selvästi yleisempiä matalissa teholuokissa, kun taas suurissa teholuokissa käytetään tyypillisesti kolmivaihelaitteita. Toisessa Schneider Electricin julkaisussa vuodelta 2011 [20] kerrotaan, että verkkointeraktiivista UPS-topologiaa suositetaan erityisesti matalan tehon laitteissa alle 750 VA:n luokassa. Verkkointeraktiivinen ja kaksoismuunnos-UPS kilpailevat teholuokassa 750 VA – 5000 VA, kun taas yli 5000 VA:n luokassa verkkointeraktiivinen UPS on historiallisesti ollut epäkäytännöllinen [20]. Koska vuoden 2014

julkaisu [19] käsittelee tyypillisesti matalatehoisia yksivaihelaitteita, voidaan tehdä johtopäätös, että se koskettaa erityisesti verkkointeraktiivista UPS:ia, mutta se on melko hyvin sovellettavissa myös kaksoismuunnos-UPS:iin. Vuoden 2014 julkaisun [19] mukaan yksivaihe-UPS-laitteen vikaherkimmät osat ovat akusto, puhaltimet, elektrolyyttikondensaattorit, metallioksidivaristorit ja releet.

ABB:n esityksessä vuodelta 2012 [21] käsitellään sähkökäyttöjen ehkäisevää kunossapitoa. Sähkökäytöt ovat rakenteeltaan erittäin samanlaisia kaksoismuunnos-UPS:n verrattuna, ja merkittävimmät erot ovat akuston puuttuminen välipiiristä sekä lähtösuodattimen puuttuminen. Dokumentin mukaan elektrolyyttikondensaattoreiden keskimääräinen elinikä on 6 – 15, akkujen 2 – 5, puhallinlaakerien 3 – 7 ja kondensaattoripankkien 8 – 12 vuotta. Todennäköisesti kondensaattoripankeilla tarkoitetaan AC-suodattimien kondensaattoreita, vaikka nimityksellä voidaan viitata mihin tahansa useamman kondensaattorin kytkentään.

	Year																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
<b>Preventive maintenance (PM)</b>																				
UPS PM /with infrared scan	♦	♦	♦	♦	♦	♦	♦	♦	♦	♦	♦	♦	♦	♦	♦	♦	♦	♦	♦	♦
Battery PM	♦	♦	♦	♦	♦	♦	♦	♦	♦	♦	♦	♦	♦	♦	♦	♦	♦	♦	♦	♦
Thermography (infrared scan)	♦	♦	♦	♦	♦	♦	♦	♦	♦	♦	♦	♦	♦	♦	♦	♦	♦	♦	♦	♦
<b>Replacement parts</b>																				
Air filter	♦	♦	♦	♦	♦	♦	♦	♦	♦	♦	♦	♦	♦	♦	♦	♦	♦	♦	♦	♦
Static switch fan					♦					♦					♦					♦
Fan					♦					♦					♦					♦
ISBM interface PCB										♦										♦
UPM interface PCB										♦										♦
ISBM control board										♦										♦
UPM control board										♦										♦
Static switch board												♦								
Power module										♦										♦
ISBM power supply PCB										♦										♦
UPM power supply PCB										♦										♦
Mini CSB PCB										♦										♦
Display assembly										♦										♦
Battery (VRLA)			—	—				—	—				—	—				—	—	
Battery (wet cell)															♦					
AC capacitor				—	—	—	—			—	—	—			—	—	—			♦
DC capacitor (9390/9395)																				♦
DC capacitor 9315				—	—	—	—			—	—	—			—	—	—			♦

Kuva 9: Tyypillinen Eaton kolmivaihe-UPS:n huolto-ohjelma. Oranssi merkki tarkoittaa tarkastusta ja tarvittaessa vaihtoa. Sininen viiva taas tarkoittaa suositeltua komponentin vaihtoa-jankohtaa. [22]

### 3.2.3 Yritysten huolto-ohjelmat

Kuvassa 9 havainnollistetaan tyypillisiä Eatonin UPS-laitteen ehkäiseviä huoltotoimenpiteitä 20:n vuoden ajanjaksolla. Kuvasta nähdään, että tarkastuksia suoritetaan kaikkein eniten jäähdytysjärjestelmän komponenteille eli ilmansuodattimille vuoden välein ja jäähdytyspuhaltimille viiden vuoden välein. Tätä seuraa akuston vaihto noin 3 – 5:n vuoden välein, sekä AC-suodatus- että välipiirikondensaattoreiden vaihto 5 – 7:n vuoden välein. Kymmenen vuoden välein tarkastetaan käytännöllisesti katsoen jokainen UPS-laitteen osa piirikortteja ja tehomodueleita myöten.

Eatonin laitekohtaiset huolto-ohjelmat [6, 7, 8] noudattavat lähtökohtaisesti melko samaa linjaa kuin mitä kuvassa 9 esitetään. Niissä kuitenkin esitetään huoltotoimenpiteitä hieman laajemmin ja lisäksi kerrotaan tarkemmin käyttöympäristön ehdoista ja vaikutuksista esitettyyn huoltoväliin.

Laitekohtaisissa huolto-ohjelmissa [6, 7, 8] tarkennetaan jäähdytyskomponenttien osalta, että ilmansuodattimet tulisi tarkastaa neljän kuukauden välein ja puhaltimet vuoden välein. Jos laitetta käytetään likaisessa ja kosteassa ympäristössä, niin suodattimet tulisi vaihtaa jopa 2 – 3 kertaa vuodessa. Puhaltimien 5 – 7:n vuoden vaihtoiikään vaikuttaa lian ja kosteuden lisäksi myös korkea lämpötila ja yhden laitteen tapauksessa kuormitustaso. Ilmansuodattimien huoltotoimenpiteitä saavat suorittaa laitteen käyttäjät itse, mutta puhaltimien tarkastuksiin ja vaihtoon vaaditaan Eatonin hyväksymä huoltohenkilö.

Kahteen huolto-ohjelmaan [6, 7] sisältyy vuosittainen kondensaattoreiden tarkastus ja kapasitanssin mittaaminen. Nämä toimenpiteet saa suorittaa vain Eatonin hyväksymä huoltohenkilö. Huolto-ohjelmissa kerrotaan lisäksi, että kondensaattorien ikääntymiseen vaikuttaa sähkövirran sykkeisyys, lämpötila ja laitteen kuormitustaso. Myös sillä on merkitystä onko kaksoismuunnos-UPS-laitetta käytetty kaksoismuunnostilassa vai erilaisissa energiansäästötiloissa. Eatonin kaksoismuunnos-UPS-laitteet voivat säästää energiaa esimerkiksi sammuttamalla redundantteja rinnakkaisia tehomodueleita.

Yhden Eatonin UPS-laitteen tehomoduulit vaihdetaan 20:n ja toisen 15:n vuoden välein. Moduulien ikääntymiseen vaikuttaa virran sykkeisyys, energiansäästötilat, kuormitustaso, ympäristön likaisuus ja lämpötila sekä laitteen tulossa ja lähdessä käytetyt jännitteet. Molemmissa laitteissa piirikortteja vaihdetaan 10 – 15 vuoden välein riippuen ympäristön likaisuudesta, kosteudesta ja lämpötilasta. [6, 7]

ABB:n julkaisussa [23] esitellään UPS-laitteiden ennakoivan huollon konseptia. Dokumentissa kerrotaan, että ABB:n UPS-laitteille tulisi suorittaa vuoden välein "tavallinen huolto," jonka sisältöä ei kuitenkaan tarkemmin avata. ABB:n suosituksena on vaihtaa jäähdytyspuhaltimet kolmen ja AC- sekä DC-kondensaattorit 5 – 6:n vuoden välein riippuen kondensaattorityypistä.

Toisessa ABB:n julkaisussa [24] esitellään yksityiskohtaisesti ABB ACS800 sähkökäyttöjen huolto-ohjelma. Ohjelman mukaan laitteiden käyttäjien tulisi vuosittain vaihtaa ilmansuodattimet sekä tarkastaa muun muassa laitteen kytkennät, ympäristöolosuhteet ja katkaisijoiden toiminta. Muut huoltotoimenpiteet tulisi suorittaa kolmen vuoden välein. Jäähdytyspuhaltimet vaihdetaan laitteesta ja puhallintyyppistä riippuen 3 – 9:n vuoden välein. Elektrolyyttikondensaattorit tulisi vaihtaa



9:n ja LCL-suodattimen kondensaattorit 6 – 9:n vuoden välein riippuen käytetystä jännitteestä.

### 3.2.4 Yhteenveto ja pohdintoja

Puolijohteet ovat tutkimusten mukaan erittäin vikaherkkiä komponentteja tehoelektroniikan suuntaajissa, mutta yrityslähteiden perusteella niiden vikaantuminen on laitteissa epätodennäköistä. Puolijohteiden keskimääräiset eliniät ovat pitkiä, ja riippuen koteloinnista, ne voivat olla erittäin kalliita komponentteja. On siis mahdollista, että yritykset suunnittelevat tyypillisesti laitteen elinkaaren päättymään juuri puolijohteiden vikaantumiseen. Tehosuuntaajissa käytetään yleisesti eristehilaisia bipolaaritransistoreita (IGBT – Insulated-Gate Bipolar Transistor), mutta puolijohteilla voidaan viitata myös suuntaajan diodeihin. Kaupallisissa IGBT-komponenteissa diodi on usein integroitu samaan koteloon transistorin kanssa. UPS-laitteiden tapauksessa voidaan lisäksi viitata ohituskytkimen tyristoreihin.

Tutkimuksissa esille noussut puolijohteiden vikaherkkyys tietyissä sovelluskohteissa voisi johtua syklisistä kuormitusprofileista. Esimerkiksi moottorikäyttöissä kuormasaattaa vaihdella jatkuvasti, jolloin vaihtosuuntaajan komponentteihin kohdistuu vaihtelevia lämpökuormia. Vaihtelevasta lämpötilasta johtuva lämpömekaaninen rasitus ikäännyttää komponentteja esimerkiksi irrottamalla IGBT-moduulissa bondilankoja [25]. UPS-laitteiden tyypillisiä kuormitusprofileja voidaan pitää melko staattisina, jolloin lämpötilan muutoksista johtuva komponenttien ikääntyminen ei ole niin merkittävää kuin syklisen rasituksen sovelluksissa.

Tasa- ja vaihtosuuntaajien lisäksi UPS-laitteessa hyödynnetään akkukonvertteria ja ohituskytkintä, mutta niiden luotettavuutta ei kyseenalaistettu yrityslähteissä. Akkukonvertterin ja ohituskytkimen puolijohteet ikääntyvät UPS-laitteessa todennäköisesti hitaasti, koska niitä ei käytetä jatkuvasti, toisin kuin tasa- ja vaihtosuuntaajia. UPS-laitteen puolijohteiden kunnonvalvonnan osalta kiinnostavimmat osat ovat siis tasa- ja vaihtosuuntaajan IGBT:t ja diodit.

Tehosuuntaajissa käytetään kuitenkin myös puolijohteita nopeammin ikääntyviä komponentteja, joten puolijohteet eivät ensisijaisesti rajoita laitteen huoltovälien tiheyttä sen suunnitellun elinkaaren aikana. Puolijohdekomponentit eivät siis ole erityisen kiinnostavia tämän diplomityön näkökulmasta eikä niitä siten tutkita tarkemmin. Tämä päätelmä tehdään kuitenkin sillä oletuksella, että CBM:llä pyritään alentamaan huoltokustannuksia juurikin laitteen suunnitellun elinkaaren aikana. Jos taas pyrkimyksenä olisi nostaa laitteen suunniteltua elinikää tai luotettavuutta erityisesti elinkaaren loppupäässä, niin tässä tapauksessa kunnonvalvonnan toteuttaminen suuntaajan IGBT:ille ja diodeille olisi perusteltua.

Tutkimusten ja yritysten dokumenttien perusteella kondensaattorit ovat vikaherkkiä komponentteja tehoelektroniikan suuntaajissa. Huolto-ohjelmien mukaan kondensaattoreiden vaihtoväli on lyhyt ja todennäköisyys niiden vikaantumiselle laitteen elinkaaren aikana on siis suuri. Eatonin UPS-laitteiden huolto-ohjelmissa suositellaan vuosittaisia ammattilaisten suorittamia kapasitanssimittauksia, jotka saattavat rajoittaa yhdessä jäähdytyspuhaltimien tarkastuksien kanssa huoltokäyntien tiheyttä. Yksittäiset kondensaattorit eivät ole erityisen kalliita, mutta UPS-laitteen välipiiris-



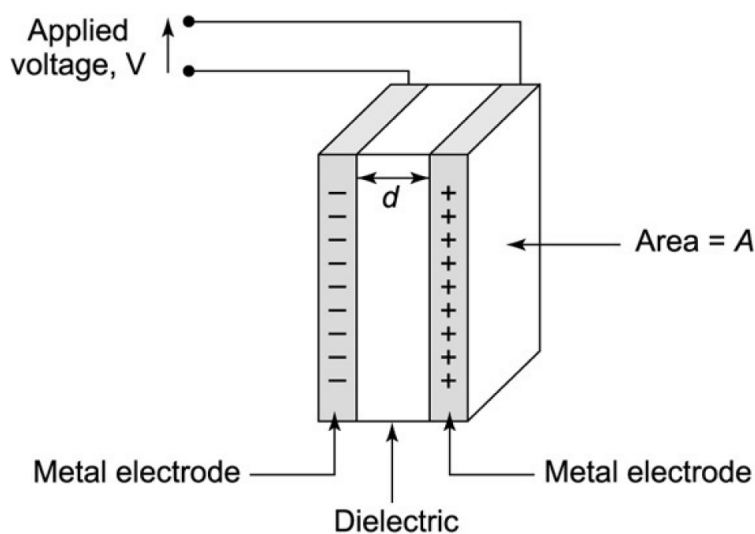
sä käytetään tyypillisesti useita kondensaattoreita rinnan. Kondensaattoripankkien hinta voi siis olla melko suuri, ja lisäksi komponenttiyksilöt voivat ikääntyä pankissa epätasaisesti. Näillä perusteilla UPS-laitteen välipiiri- ja AC-suodatuskondensaattorit ovat erittäin kiinnostavia komponentteja CBM:n näkökulmasta, ja niitä siis tutkitaan tarkemmin diplomityön luvuissa 4.1 ja 4.2. Eatonin UPS-laitteiden tehoasteissa käytetään yleisesti alumiinielektrolyytti- ja filmikondensaattoreita, joten työssä keskitytään näihin tyyppeihin.

Yrityslähteiden perusteella akusto on erityisen vikaherkkä osa UPS-laitteissa. Akustojen merkitys ei nouse esille yleisellä tasolla suuntaajien luotettavuuteen keskittyvissä tutkimuksissa, sillä akustot ovat vain UPS-laitteille ominaisia. Akusto on erittäin kallis UPS-järjestelmän osa, ja sen elinikä voi olla vain muutamia vuosia riippuen käytöstä ja ympäristöolosuhteista. Vaikka akustot osoittavat potentiaalia kunnonvalvonnalle, rajataan ne tästä diplomityöstä pois.

Jäähdytysjärjestelmän osia pidetään tutkimusten ja yrityslähteiden perusteella melko vikaherkkinä. Komponenteille suoritetaan erittäin tiheästi huoltotoimenpiteitä, mutta ainakin ilmansuodattimet ovat yleensä käyttäjien huollettavissa. Suodattimia ja puhaltimia tarvitaan laitteissa tyypillisesti useita, mutta ne ovat melko halpoja, joten kunnonvalvonta pitäisi toteuttaa edullisesti. Redundanttien puhaltimien takia laite tuskin lamaantuu välittömästi vaikka yksi puhallin sammuisikin, joten puhaltimet eivät ole kovin kriittisiä laitteen toiminnalle lyhellä ajanjaksolla. Jäähdytysjärjestelmän toiminta kuitenkin vaikuttaa laitteen lämpötilaan, joka koettiin kyselytutkimusten mukaan merkittävimmäksi suuntaajien stressitekijäksi. Jäähdytysjärjestelmän komponenttien ikääntymisen myötä heikkenevä jäähdytyskyky voi siis kiihdyttää järjestelmän muiden komponenttien ikääntymistä pitkällä ajanjaksolla. Jäähdytysjärjestelmän komponentit vaikuttavat siten melko mielenkiintoisilta kunnonvalvonnan kannalta, mutta ne rajataan pois tästä diplomityöstä.

## 4 Kondensaattorit

Kondensaattorit ovat elektronisia komponentteja, jotka varastoivat sähköenergiaa kahden toisistaan eristetyin elektrodien välille. Kondensaattorin periaatteellinen rakenne esitetään kuvassa 10. Kondensaattori ladataan kytkemällä jännite elektrodien välille, jolloin varauksenkuljettajat (elektronit) siirtyvät muodostaen samansuuruiset, mutta vastakkaiset sähkövaraukset elektrodeille. Varaukset, ja siten jännite-ero, säilyvät elektrodeissa, vaikka ulkoinen jännite poistetaan niiden väliltä, koska virtapiiriä ei muodostu. Vastakkaismerkkiset varaukset luovat välilleen sähkökentän, joka polarisoi eristeen elektrodien välissä. Ladattu kondensaattori voidaan purkaa yhdistämällä elektrodit, jolloin sähkövirta purkaa varaukset ja eristeen polarisaation.



Kuva 10: Levykondensaattorin periaatteellinen rakenne. [26]

Kapasitanssi kuvaa elektrodien sähkövarauksen ja jännite-eron suhdetta (1) mukaisesti. Kapasitanssi kuvaa siis kondensaattorin kykyä säilyttää sähkövarausta ja toisaalta kykyä säilyttää sähköenergiaa. Yksinkertaisen levykondensaattorin (kuvassa 10) kapasitanssi voidaan laskea integroimalla sähkökenttää levyjen välillä, jolloin löydetään kapasitanssin riippuvuus eristeen permittiivisyyden ja kondensaattorin geometrian välillä (2) mukaisesti. Tästä yhtälöstä huomataan, että suuri kapasitanssi saavutetaan korkean permittiivisyyden omaavalla eristeellä ja suurella elektrodilevyjen pinta-alalla sekä tuomalla elektrodilevyt mahdollisimman lähelle toisiaan.

$$C = \frac{Q}{U} \quad (1)$$

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{d} \quad (2)$$

Ideaalisen kondensaattorin virta-jänniteyhtälöstä (3) nähdään, että kondensaattori vastustaa jännitteen muutosta virran avulla. Tästä yhtälöstä voidaan johtaa

Laplace-muunnoksen ja Ohmin lain avulla ideaalisen kondensaattorin impedanssi (4), joka riippuu taajuudesta ja kapasitanssista. Siitä huomataan, että ideaalisen kondensaattorin impedanssi lähestyy nollataajuudella (tasasähköllä) ääretöntä eli avointa piiriä, kun taas äärettömän suurella taajuudella impedanssi lähestyy nollaa eli oikosulkua.

$$i_C(t) = C \frac{du_C(t)}{dt} \quad (3)$$

$$Z_C = \frac{1}{j\omega C} \quad (4)$$

Ideaalinen kondensaattori on puhtaasti kapasitiivinen komponentti, mutta todellisessa kondensaattorissa esiintyy aina lisäksi myös parasiittista resistanssia ja induktanssia, mikä vaikuttaa kondensaattorin sähköisiin ominaisuuksiin. Todellisia komponentteja voidaan mallintaa erilaisilla sijaiskytkennöillä, jotka koostuvat ideaalisista komponenteista.

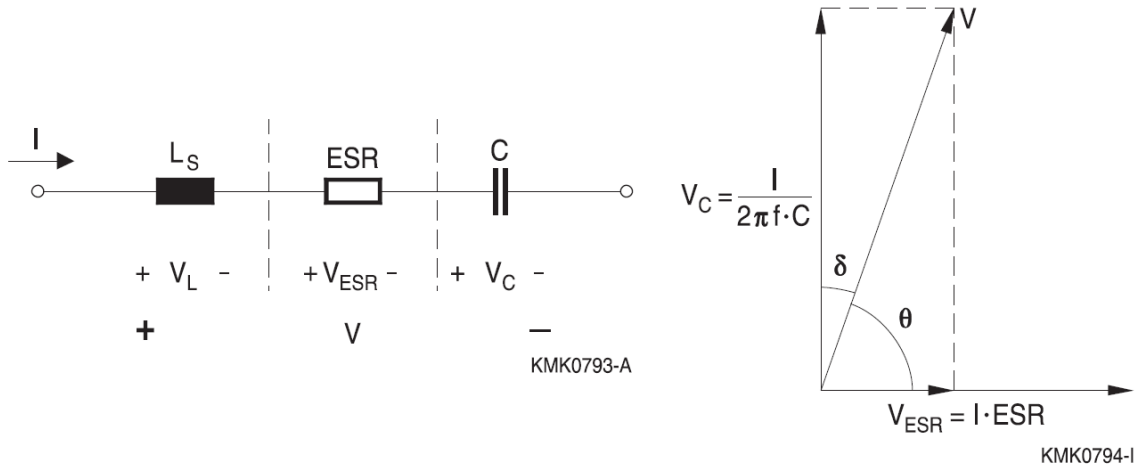
Ideaalisen kelan impedanssi (6) voidaan johtaa sen jännite-virtayhtälöstä (5) vastaavasti kuin kondensaattorillekin. Ideaalinen kela on puhtaasti induktiivinen komponentti ja sähköisiltä ominaisuuksiltaan täysin vastakkainen kondensaattorille. Ideaalinen vastus taas on puhtaasti resistiivinen komponentti, ja sen impedanssi (7) on vakio kaikilla taajuuksilla.

$$u_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} \quad (5)$$

$$Z_L = j\omega L \quad (6)$$

$$Z_R = R \quad (7)$$

Yleisesti käytetty yksinkertaistettu todellisen kondensaattorin AC-sijaiskytkentä esitetään kuvassa 11. Tässä mallissa todellisen kondensaattorin parasiittiset komponentit on jaettu ideaalisiin sarjakomponentteihin, joita kutsutaan ekvivalentiksi sarjaresistanssiksi (ESR) ja ekvivalentiksi sarjainduktanssiksi (ESL). Sijaiskytkennän impedanssi on yksinkertaisesti ideaalisten komponenttien summa (8).



Kuva 11: Kondensaattorin yksinkertaistettu AC-sijaiskytkentä ja osoitinkaavio. [27]

$$Z = R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) \quad (8)$$

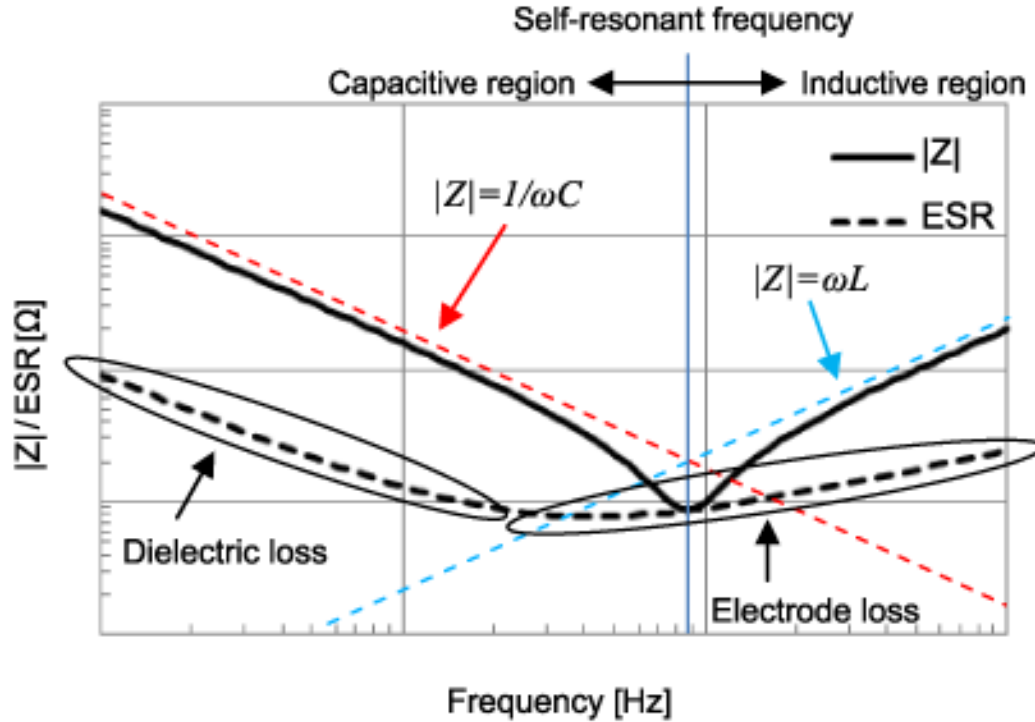
Kuvassa 12 esitetään sijaiskytkennän ja sen yksittäisten komponenttien impedanssien itseisarvot taajuuden funktiona. Kuvasta huomataan, että todellisella kondensaattorilla on raja-taajuus, johon asti se toimii kondensaattorina kapasitanssin dominoidessa impedanssia. Tämä taajuus on esitetyssä sijaiskytkennässä (kuvassa 11) kapasitanssin ja induktanssin sarjaresonanssitaajuus, ja se voidaan laskea asettamalla (8) reaktiivinen osa nolleen. Tällä resonanssitaajuudella (9) kapasitanssi ja ESL kumoavat toisensa, jolloin komponentti näyttää vastukselta ESR:n dominoidessa impedanssia. Resonanssitaajuuden yläpuolella ESL puolestaan dominoi impedanssia, jolloin todellinen kondensaattori toimii kuin kela. Todellista kondensaattoria voidaan siis approksimoida ideaalisilla komponenteilla eri taajuusalueilla (10) – (12) mukaisesti.

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (9)$$

$$Z(\omega \ll \omega_0) = -j\frac{1}{\omega C} \quad (10)$$

$$Z(\omega \approx \omega_0) = R \quad (11)$$

$$Z(\omega \gg \omega_0) = j\omega L \quad (12)$$



Kuva 12: Todellisen kondensaattorin impedanssi taajuuden funktiona [28]

Komponenttivalmistajat saattavat ilmoittaa kondensaattorin ESR:n sijasta sen häviökertoimen (DF – Dissipation Factor) [29], joka voidaan laskea sijaiskytkennän osoitinkaaviosta (kuvassa 11). Häviökerroin määritellään kondensaattoreille tyypillisesti vain kapasitanssin ja resistanssin avulla (13) mukaisesti, sillä matalilla taajuuksilla ESL:n jänniteosio on häviävän pieni [27].

$$\tan \delta = \omega CR \quad (13)$$

Esitetty todellisen kondensaattorin malli (kuvassa 11) ei ole täydellinen. Se ennustaa taajuuskäyttäytymistä hyvin, mutta se ei huomioi muun muassa eristeen sähköisiä ominaisuuksia. Eristeresistanssi määritellään tasasähkölle [27], joten AC-sijaiskytkennöissä se näkyy avoimena piirinä. Ideaalisen eristeen eristeresistanssi on ääretön, mutta todellisella eristeellä se on kuitenkin äärellinen. Tämän vuoksi todellisen kondensaattorin läpi kulkee vuotovirta jännite kytkettynä, ja se läpäisee vaihtovirran lisäksi siis tasavirtaa [30]. Todellisella eristeellä on myös läpilyöntijännite, jonka ylittämällä eriste muuttuu johtavaksi, ja siksi todellinen kondensaattori kestää vain rajallisen jännitteen. Näitä erilaisia eristeen epäideaalisuuksia voidaan mallintaa sijaiskytkennöissä [9, 27, 30, 31, 32] kapasitanssin rinnalle kytketyillä komponenteilla.

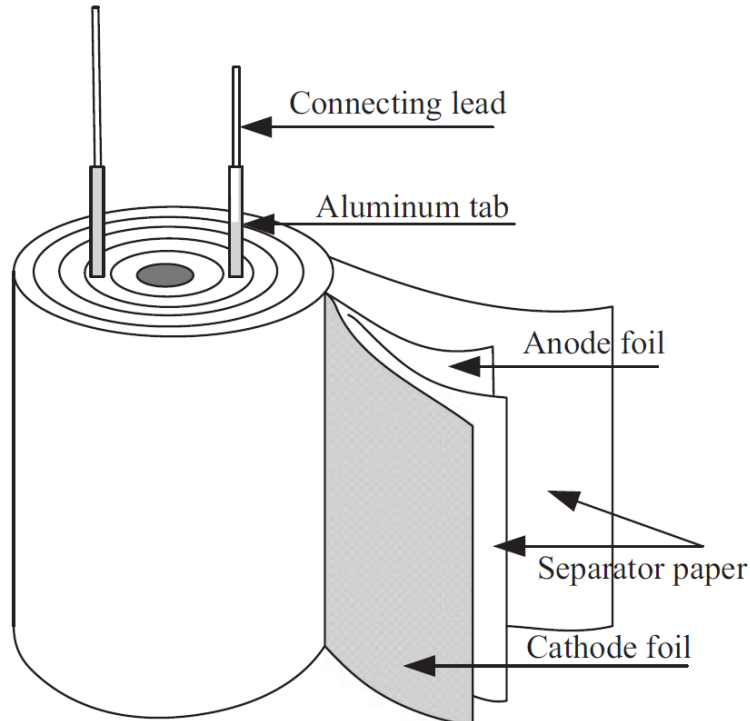
Esitettyssä mallissa (kuvassa 11) ei myöskään huomioida resistanssin muutosilmiöitä, vaan ESR oletetaan vakioksi kaikilla taajuuksilla. Todellisen kondensaattorin ESR on tyypillisesti matalilla taajuuksilla suurempi eristeeseen liittyvien ilmiöiden takia. Erittäin korkeilla taajuuksilla puolestaan havaitaan elektrodijohtimiin liittyviä

ilmiöitä, kuten virranajoitusilmiö ja keskinäisvaikutukset, jotka kasvattavat ESR:ää. [27, 28] ESR:n taajuuskäyttäytymistä havainnollistetaan kuvassa 12.

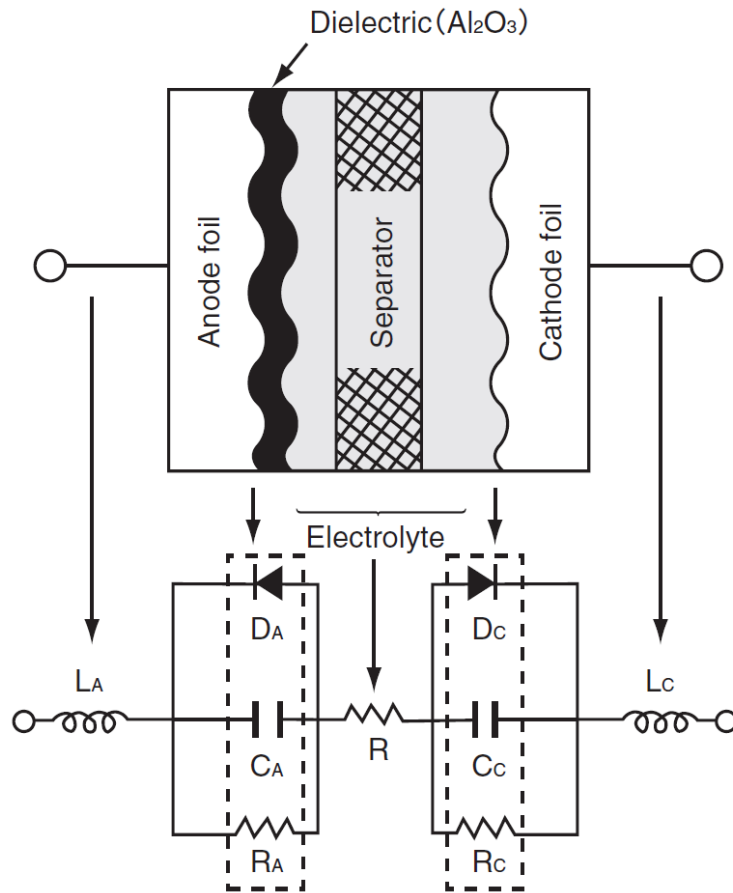
#### 4.1 Alumiinielektrolyyttikondensaattori (AEC)

Tyypillisen polaarisen nestemäistä elektrolyyttiä sisältävän alumiinielektrolyyttikondensaattorin (AEC – Aluminium Electrolytic Capacitor) sisäiset rakenteet ja eräs sähköinen vastinpiiri esitetään kuvissa 13 ja 14. Nestemäisen elektrolyytin lisäksi AEC:t voivat hyödyntää myös kiinteää elektrolyyttiä tai molempia [33], mutta näihin erikoisempiin tyyppeihin ei perehdytä tässä diplomityössä.

Tyypillinen AEC koostuu rullalle käärityistä alumiinisista anodi- ja katodifolioista, erotinpaperista, elektrolyyttiliuoksesta ja terminaalijohdinliuskoista. Anodifolion päälle muodostetaan valmistusprosessissa alumiinioksidikerros, joka toimii kondensaattorin eristeenä. Katodifolion ei tyypillisesti muodosteta eristekerrosta, mutta sellainen syntyy kondensaattorissa spontaanisti. [32] Spontaanin eristeen jännitekesto on kuitenkin heikko, vain noin 0,5 voltia [32, 33]. AEC:n todellinen katodi on elektrolyyttiliuos [32, 34] eikä hieman harhaanjohtavasti nimetty katodifolio. Katodifoliot tarvitaan kuitenkin hyvän sähköisen kontaktin luomiseksi elektrolyytin ja terminaalijohdinten välille [32]. Elektrolyytti on imeytetty erotinpaperiin, joka muun muassa estää oikosulkeutumisen [35] ja varmistaa elektrolyytin tasaisen jakautumisen sekä pitää elektrodifolioiden välisen etäisyyden samana. [32]

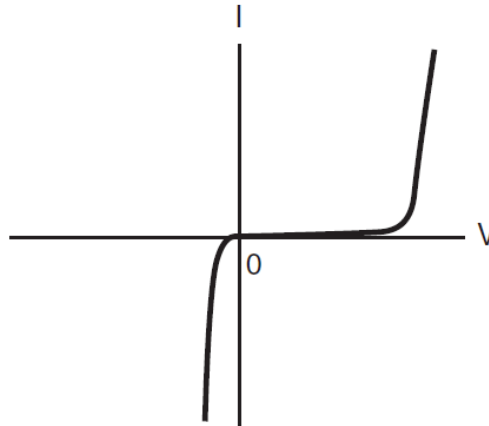


Kuva 13: Elektrolyyttikondensaattorin fyysinen rakenne. [36]



Kuva 14: Alumiiniektrolyyttikondensaattorin poikkileikkaus ja sen sähköinen vastinpiiri. [32]

AEC:t ovat tyypillisesti polaarisia komponentteja, koska vain anodifoliolle kasvatetaan yleensä alumiinioksidikerros ja alumiinioksidi ei kykene eristämään jännitettä toiseen suuntaan (kuvassa 15). Tätä ominaisuutta mallinnetaan kuvan 14 vastinpiirissä diodeilla. Jo pienellä myötäsuuntaisella jännitteellä AEC muuttuukin hyvin johtavaksi [34], jolloin se lämpenee nopeasti ja tapahtuu sähkökemiallinen reaktio, jossa vapautuu vetyä [33]. Tämän seurauksena AEC:n sisäinen paine kasvaa, jolloin se vahingoittuu ja voi räjähtää. Vastaava ilmiö tapahtuu myös, kun eristeen jännitekestoisuus ylitetään suurella vastakkaisuuntaisella jännitteellä [34]. Polaarisuudesta johtuen AEC:itä voidaan siis käyttää vain DC-sovelluksissa tai sopivasti biasoituna AC-sovelluksissa.



Kuva 15: Alumiinioksidin  $\text{Al}_2\text{O}_3$  jännite-virtakäyrä. [32]

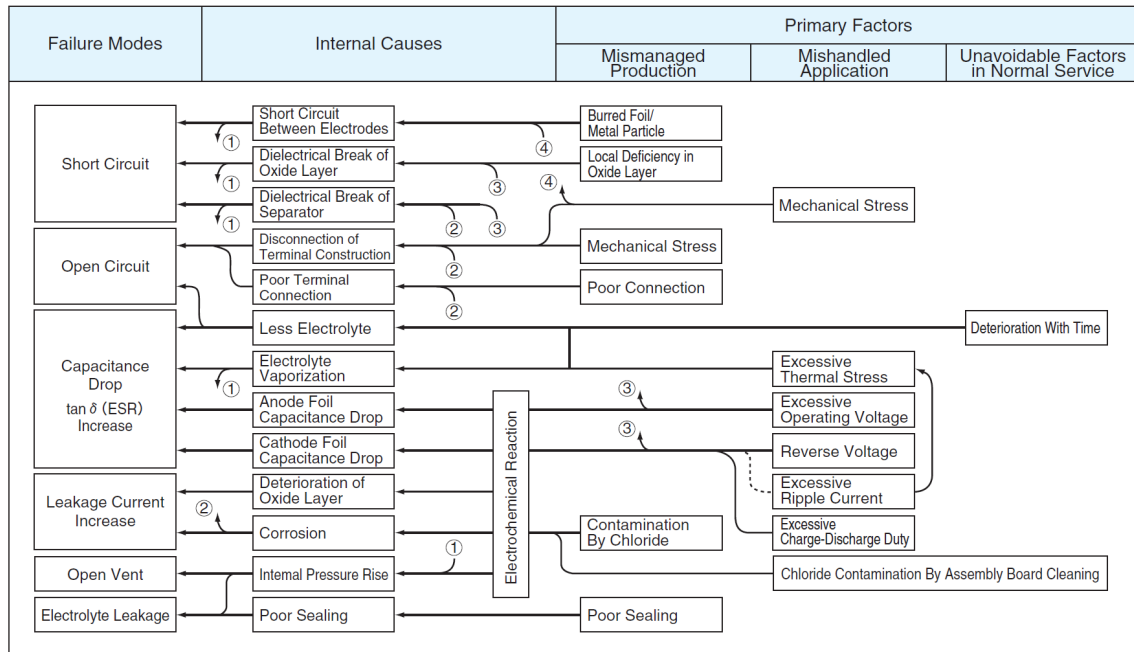
Alumiinielektrolyyttikondensaattorit ovatkin yksi yleisimmistä kondensaattorityypeistä välipiirisovelluksissa [31]. Niiden suurimpina vahvuuksina on suuri kapasitanssi ja energiatiheys sekä edullinen hinta varastoituun energiaan nähden. Merkittävimmät haittapuolet ovat taas suuri ESR ja häviökerroin, kapea taajuusalue sekä heikko yliaaltokestoisuus ja luotettavuus rasituksessa. [9] Suuri kapasitanssi tilavuuteen nähden saavutetaan elektrodifolioiden etsaamisella saavutetulla suurella efektiivisellä pinta-alalla ja alumiinioksidin suurella jännitekestolla, joka sallii ohuen eristeen. [32] Suurta ESR:ää selittää elektrolyytin resistanssi, joka on muun rakenteen resistanssia selvästi suurempi [36]. Erotinpaperilla on erittäin suuri vaikutus ESR:ään, sillä elektrolyytin ja erotinpaperin yhdistelmällä on noin kymmenkertainen resistanssi verrattuna pelkkään elektrolyyttiin [37].

#### 4.1.1 Vikaantuminen

Alumiinielektrolyyttikondensaattoreilla on kolme vikamoodia: oikosulku, avoin piiri ja sähköisten parametrien ajautuminen rappeutumisen myötä [9, 36]. Oikosulkuihin ja avoimen piirin vikoihin voidaan viitata katastrofaalisilla vioilla, sillä näissä vikamoodeissa AEC:n toiminnallisuus menetetään täysin [32, 36]. Kulumisesta johtuvan vian kriteerit puolestaan vaihtelevat komponentin käyttötarkoituksesta [32, 34], eikä tämän vikamoodin saavuttaminen välttämättä tarkoita ympäröivän laitteen täydellistä vikaantumista [35]. Eri vikamoodeista avoimen piirin ja parametrien ajautumisen viat ovat dominoivia [9].

Kuvassa 16 esitetään AEC:n vikamoodit, vikamekanismit ja pääasialliset vaikutustekijät. Vastaavia tuloksia esitetään myös muissa lähteissä [9, 34, 36], mutta suppeammin. On esitetty [9], että pienikokoisten AEC:iden ("snap-in-tyyppisten") merkittävin rappeutumismekanismi on elektrolyytin haihtuminen, kun taas suurikokoisten AEC:iden merkittävin mekanismi on oksidikerroksen sähkökemialliset reaktiot. Vastaaviin tuloksiin on päädytty myös muualla [36], mutta kokoerottelua ei ole tehty. Tärkeimmiksi rappeutumisen vaikutustekijöiksi on puolestaan listattu [36] pitkittynyt käyttö, korkea sisäinen lämpötila, ylijännite sekä lataus/purkaussyklien määrä.





Kuva 16: Alumiinielektrolyttikondensaattorin vikamekanismit. [32] Kuvassa ei ole selkeyden vuoksi piirretty kaikkia vuorovaikutussuhteita osoittavia nuolia, vaan osa nuolista on numeroitu. Seuraamalla numeroitujen nuolien osoittamia reittejä löydetään lisävuorovaikutuksia.

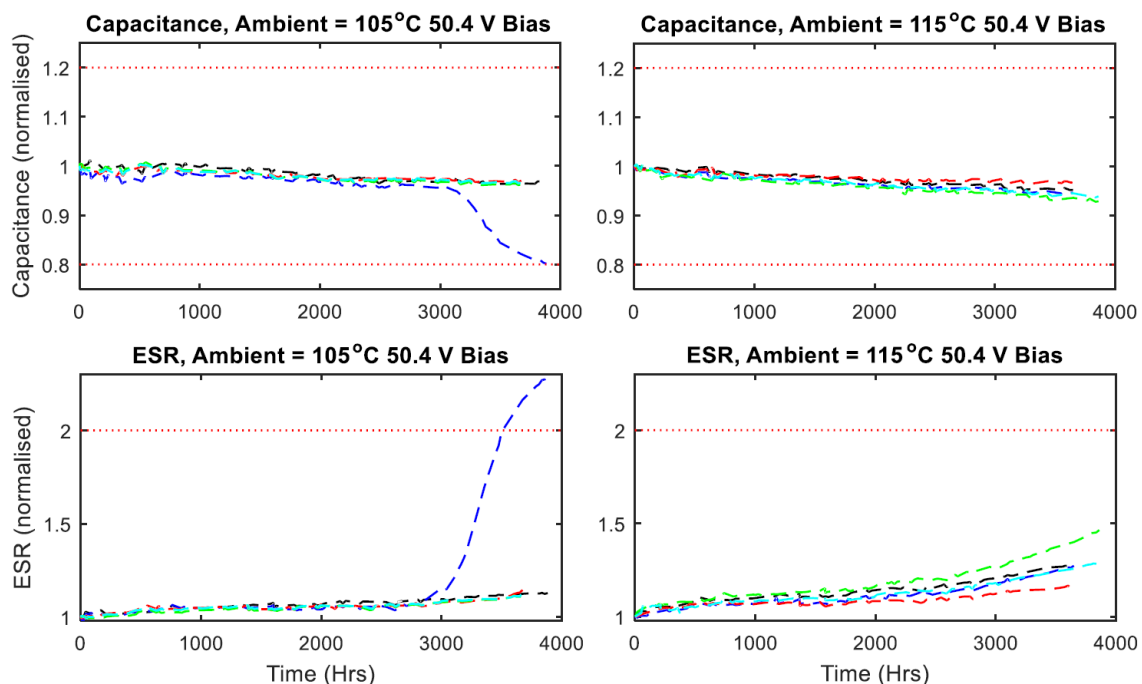
#### 4.1.2 UPS-laitteen kunnonvalvonnan kannalta kiinnostavat parametrit

UPS-laitteissa alumiinielektrolyttikondensaattoreita käytetään tyypillisesti välipiirissä DC-suodatukseseen. Suodatuskondensaattoreiden elinikään vaikuttaa voimakkaasti ympäristön lämpötila sekä virran sykkeisyydestä johtuva lämpeneminen [32]. Kuvan 16 perusteella nämä tekijät vaikuttavat erityisesti elektrolyytin haihtumiseen, joka johtaa kapasitanssin pienenemiseen ja ESR:n sekä häviökertoimen kasvamiseen. Kuvan 16 mukaan haihtumisen myötä myös kondensaattorin sisäinen paine kasvaa, mikä voi johtaa elektrolyytin vuotamiseen komponentista tai ylipaineventtiilin avautumiseen. Haihtumisen takia AEC:n massa ja sen sisältämän elektrolyytin tilavuus pienenee ajan myötä.

Kuten luvussa 2.2 esitetään, kunnonvalvonnan näkökulmasta on erityisen kiinnostavaa mitata parametreja, jotka ennakoivat komponentin vikaantumista mahdollisimman aikaisin pitkällä ajanjaksolla. AEC:n pääasiallinen rappeutumismekanismi UPS-laitteen välipiirissä on elektrolyytin haihtuminen lämpörasituksen ja ajan vaikutuksesta, joten on järkevintä mitata tähän mekanismiin linkittyviä parametreja tai vaikutustekijöitä. Näitä mahdollisia parametreja ovat kapasitanssi, ESR, massa, elektrolyytin tilavuus, sisäinen paine, lämpötila ja aika. Yleisesti ja käytännössä helposti mitattavia parametreja UPS-laitteessa ovat sähköiset parametrit, lämpötila ja aika. Kondensaattorin massan, elektrolyytin tilavuuden tai sisäisen paineen mittaaminen käytännössä puolestaan vaatisi täysin epäsovinnaisia ratkaisuja, joten

niiden tarkempi tutkiminen ei ole järkevää tämän diplomityön puitteissa.

Kapasitanssi ja ESR linkittyvät suoraan AEC:n tärkeimpään rappeutumismekanismiin, ja lisäksi komponentin toiminnallisuuteen sähköisessä piirissä, joten ne ovat erinomaisia kuntoindikaattoreita kunnonvalvontaa varten. Lämpötila ja aika taas ovat vaikutustekijöitä, jotka eivät suoraan kerro komponentin tilaa kyseisellä hetkellä, mutta vaikuttavat pääasiallisen rappeutumismekanismien etenemiseen. Luvussa 2.1 esitetyn määritelmän mukaisesti pelkästään lämpötilaan tai aikaan perustuva kunnossapito onkin ehkäisevää eikä kuntoperustaista kunnossapitoa. UPS-laitteen välipiirin AEC:iden kunnonvalvonnassa kannattaa siis mitata kapasitanssia ja/tai ESR:ää, ja näiden tukena voidaan myös mitata lämpötilaa ja aikaa.



Kuva 17: AEC:n kapasitanssin ja ESR:n kehittyminen vakiojännitteellä korkeassa lämpötilassa. [38]

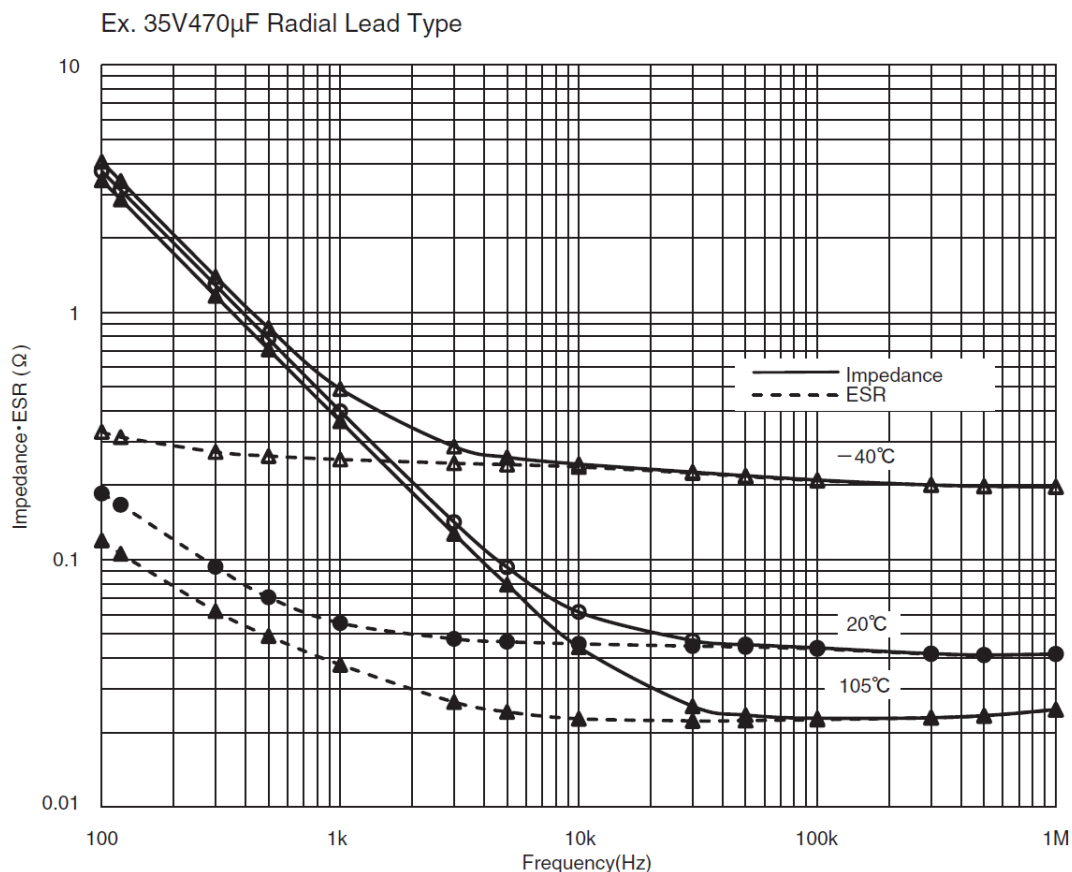
Käytännölliset kondensaattorin kunnonvalvontamenetelmät mittaavat usein vain yhtä rappeutumisparametria kerrallaan, joten on järkevää tarkastella kumpi parametreista (kapasitanssi vai ESR) soveltuu paremmin välipiirisovelluksiin. Aiemassa tutkimuksessa [38] on selvitetty testaamalla miten AEC:n kapasitanssi ja ESR muuttuvat erilaisissa rasituksissa ajan myötä. Välipiirisovellusta vastaa eniten testi, jossa kondensaattoreita ikäännytettiin korkeassa lämpötilassa vakiojännitteellä, joka oli 80 %:a spesifioidusta jännitekestosta. Kuvassa 17 esitetään mittaustulokset, joista huomataan, että ESR:n muutosnopeus alkaa kasvamaan hieman kapasitanssin muutosnopeutta aikaisemmin. Toisessa kokeessa yksi komponentti saavutti testin aikana sekä kapasitanssin että ESR:n eliniän päättymisen kriteerit, ja näistä ESR:n raja-arvo saavutettiin aiemmin. Koska kunnonvalvonnalla pyritään havaitsemaan

vikaan johtavia muutoksia mahdollisimman aikaisin, on näiden tulosten perusteella ESR siis kapasitanssia hieman kiinnostavampi parametri välipiirisovelluksissa.

#### 4.1.3 Mittausolosuhteiden vaikutukset

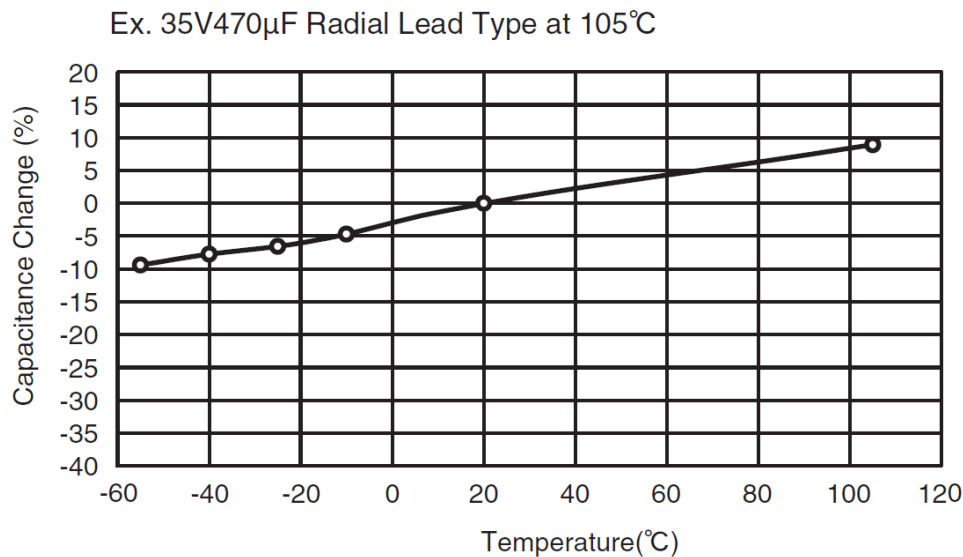
AEC:n kunnonvalvonnassa mitattuun kapasitanssiin ja ESR:ään voi vaikuttaa merkittävästi lämpötila ja mittaustaajuus. Voimakkaasti vaihtelevissa olosuhteissa saadut mittaustulokset eivät siis välttämättä ole vertailukelpoisia keskenään, ellei mittaustaajuuden ja lämpötilan vaikutuksia huomioida.

Kuvassa 18 havainnollistetaan erään pienen AEC:n mitatun ESR:n taajuus- ja lämpötilakäyttäytymistä. Kuvasta huomataan, että mitattu ESR on suurempi pienissä lämpötiloissa ja matalilla taajuuksilla. Esimerkiksi 100 hertsin taajuudella 20 °C:n lämpötilassa mitattu ESR on lähes kaksinkertainen verrattuna 105 °C:n lämpötilaan. Vastaavasti esimerkiksi 20 °C:n lämpötilassa 100 hertsin taajuudella havaitaan noin kolminkertainen ESR verrattuna 1000 hertsin taajuuteen.

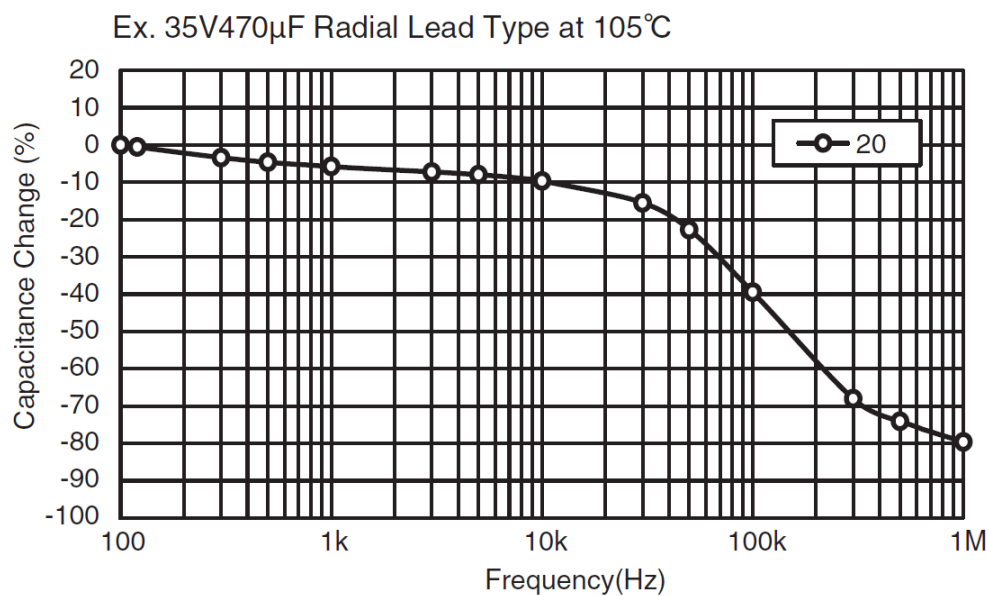


Kuva 18: Esimerkki erään AEC:n mitatun impedanssin ja ESR:n taajuus- ja lämpötilakäyttäytymisestä [32].

Kuvissa 19 – 20 puolestaan havainnollistetaan AEC:n kapasitanssin lämpötila- ja taajuusriippuvuuksia. Kuvasta 19 huomataan, että mitattu kapasitanssi kasvaa lämpötilan myötä, ja esimerkiksi 105 °C:n lämpötilassa mitattu kapasitanssi on noin 9 %:a suurempi kuin 20 °C:n lämpötilassa. Kuvasta 20 taas nähdään, että mitattu kapasitanssi pienenee taajuuden kasvaessa, ja esimerkiksi 1000 hertsin taajuudella havaitaan noin 5 %:a pienempi kapasitanssi kuin 100 hertsin taajuudella.



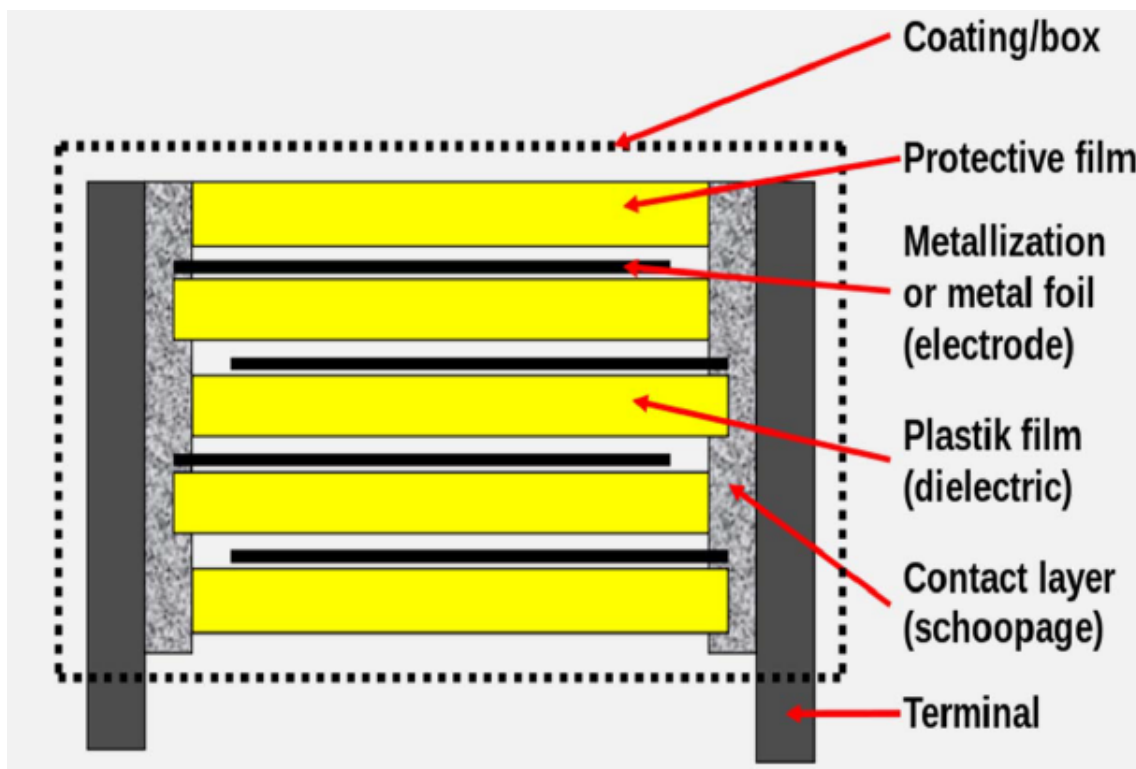
Kuva 19: Esimerkki erään AEC:n mitatun kapasitanssin lämpötilakäyttäytymisestä. [32]



Kuva 20: Esimerkki erään AEC:n mitatun kapasitanssin taajuuskäyttäytymisestä. [32]

## 4.2 Filmikondensaattori

Filmikondensaattorit voidaan jakaa kolmeen ryhmään niiden sisäisen rakenteen perusteella: metalloituun, folio- ja hybridityyppeihin. Metalloidussa filmikondensaattorissa elektrodit muodostetaan höyrystämällä ohut kerros alumiinia, sinkkiä tai niiden seosta eristefilmin päälle. Foliotyypissä eristefilmit ja alumiiniset elektrodit ovat toisistaan fyysisesti irrallisia. Hybridifilmikondensaattorissa hyödynnetään sekä metalloituja filmejä että toisistaan irrallisia folioita ja filmejä, joten se yhdistää kaksi ensimmäistä tyyppiä. [39] Metalloidun tyyppin etuina on korkea energiatiheys ja itsekorjautuvuus (selitetään luvussa 4.2.1) [39, 40], kun taas foliotyyppin erityisenä etuna on korkea virrankesto [39, 40, 41].



Kuva 21: Filmikondensaattorin yleinen sisäinen rakenne. [42]

Filmikondensaattorin yleinen sisäinen rakenne esitetään kuvassa 21, josta nähdään kuinka joko metalloidut filmi- tai foliokerrokset yhdistetään päätymetalloinnin (useita eri metalleja ehdotettu [41, 43, 44]) avulla toisiin kerroksiin. Terminaali johtimet liitetään päätymetallointiin hitsaamalla [40] tai juottamalla [40, 44]. Metalloidussa tyyppissä voidaan muodostaa paksumpi metallointi filmin reunoille virrankantokyvyn kasvattamiseksi ja paremman kontaktin luomiseksi päätymetallointiin [41, 44]. Kerrosrakenne voidaan muodostaa joko rullaamalla tai pinoamistekniikalla, jossa kerrokset leikataan suuren halkaisijan kelalta [27, 45]. Lopulta kondensaattori suojataan koteloinnilla, joka on tyypillisesti alumiinia tai polyesterimuovia. Metallikotelot

täytetään usein sähköisesti eristävällä nesteellä kuten risiiniöljyllä, ja muovikotelot puolestaan täytetään epoksihartsilla. [43]

Filmikondensaattorien ominaisuudet ja sovellusmahdollisuudet vaihtelevat voimakkaasti käytetyn eristemateriaalin mukaan [27]. Nykyisin eristeenä käytetään pääasiassa erilaisia polymeerejä, kuten polypropeenaa (PP) tai polyeteenitereftalaattia (PET). Muita mahdollisia eristemuoveja erikoissovelluksissa on esimerkiksi polyeteeninaftalaatti (PEN) tai polyfenyleenisulfidi (PPS). Aikoinaan on käytetty puhdasta paperia tai muovin ja paperin sekoitusta. [45] Kuvassa 22 esitetään kahden yleisimmän eristemateriaalin [43] ominaisuuksien vertailu, josta huomataan, että PP häviää PET:lle vain pienemmällä permittiivisyydellä ja lämmönkestolla. On esitetty toinen lähes vastaava vertailu [27], jonka mukaan molemmilla eristeillä kapasitanssi ajautuu ajan myötä yhtä paljon kuvasta 22 poiketen. PP:n hyviä ominaisuuksia on suuri eristeresistanssi (IR – Insulation Resistance), jonka myötä häviöt ja vuotovirta ovat pieniä, suuri jännitekesto, erinomainen kyky vastustaa kosteutta sekä vakaus pitkällä ajanjaksolla. [40]

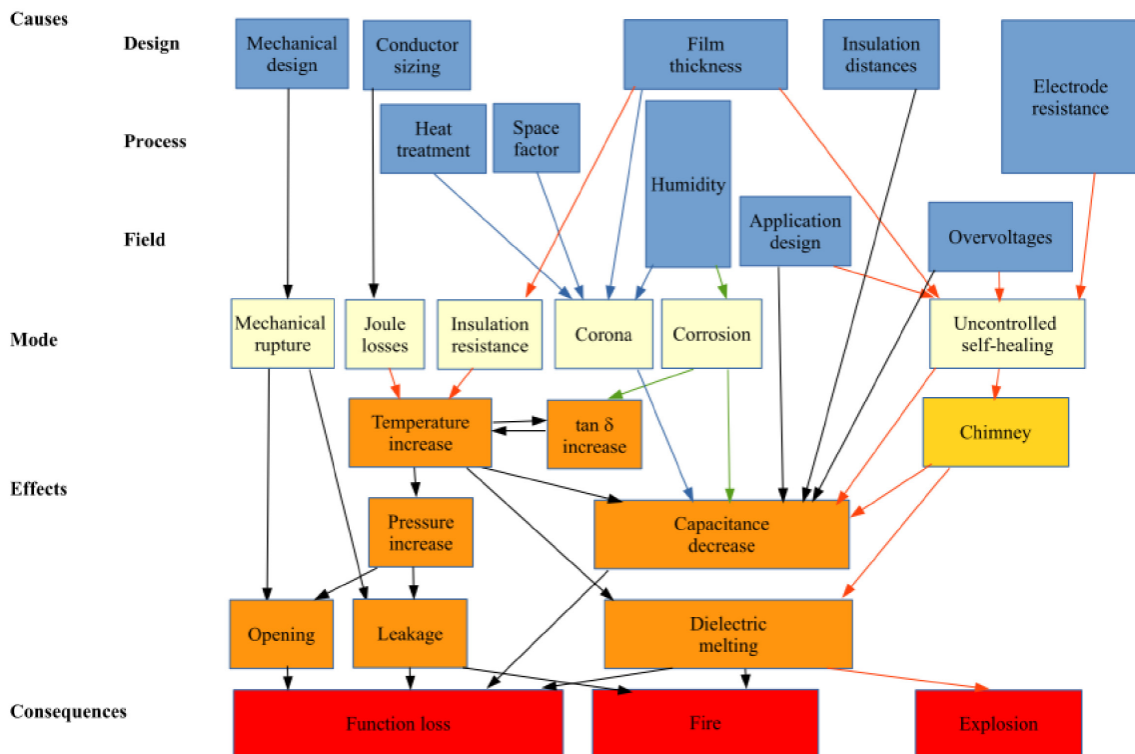
<b>DIELECTRIC PROPERTIES (TYPICAL VALUES)</b>		
<b>PARAMETER</b>	<b>PET</b>	<b>PP</b>
Relative dielectric constant	3.2	2.2
DF at 1 kHz (tan $\delta$ in %)	0.5	0.02
IR (M $\Omega$ x $\mu$ F)	25 000	100 000
Dielectric absorption (%)	0.2	0.05
Capacitance drift - $\Delta C/C$ (%)	1.5	0.5
Moisture absorption (%)	0.4	0.01
Maximum temperature (°C)	125	100
TC (ppm/°C)	+ 400, $\pm$ 200	- 200, $\pm$ 100

Kuva 22: Tyypillisiä PET- ja PP-muovien ominaisuuksia. [40]

Metalloituja polypropeenifilmikondensaattoreita (MPPF – Metallized Poly Propylene Film) on yleisesti saatavissa tehoelektroniikan sovelluksia varten [46]. UPS-sovelluksissa polypropeeni on ensisijainen eristemateriaali lähdön AC-suodatuskondensaattoreille hyvien sähköisten ominaisuuksien ja kohtuullisen hinnan vuoksi. Tässä sovelluksessa metalloitu filmi on foliotyyppiä houkuttelevampi vaihtoehto erityisesti, koska metalloidulla tyypillä saavutetaan pienempi tilavuus samalla kapasitanssilla. [41] MPPF-kondensaattorien yleisyyttä UPS-laitteen tulon ja lähdön AC-suodatuksessa tukee myös esimerkiksi TDK/EPCOS tuotekuvasto [11], jossa näihin tarkoituksiin tarjotaan vain erilaisia MPPF-kondensaattoreita. Tässä diplomityössä jatkotutkimukset filmikondensaattoreista rajataan siis metalloituihin ja erityisesti MPPF-kondensaattoreihin niiden yleisyyden takia UPS-laitteen tulon ja lähdön AC-suodatuksessa.

#### 4.2.1 Vikaantuminen

Metalloiduilla filmikondensaattoreilla on kolme vikamoodia: oikosulku, avoin piiri ja sähköisten parametrien ajautuminen rappeutumisen myötä [31, 43]. Kuvassa 23 esitetään oleelliset metalloidun filmikondensaattorin vikamekanismit ja niiden vaikutustekijät.



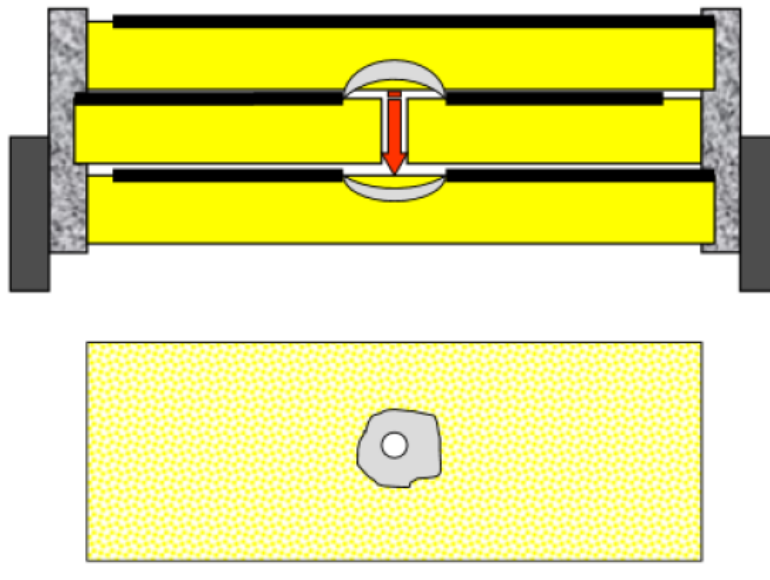
Kuva 23: Metalloidun filmikondensaattorin vikamekanismit. [45]

On esitetty [43], että metalloidulla filmikondensaattorilla on neljä pääasiallista vikamekanismia: itsekorjautuvuuteen liittyvät eristeen läpilyönnit, osittais- tai koronapurkaukset, elektrodien korroosio ja päätymetalloinnin lämpömekaaninen rappeutuminen. On myös esitetty [31], että MPPF-kondensaattorin dominoivat vikamekanismit välipiirisovelluksissa ovat itsekorjautuvuus ja korroosio. Tässä lähteessä [31] koronapurkauksia ei pidetä merkittävänä vikamekanismina, sillä koronapurkaukset ovat vain AC-sovelluksille ominaisia [42, 43].

Metalloidun filmikondensaattorin itsekorjautuvuus on ominaisuus, jonka avulla kondensaattori kykenee palauttamaan normaalin toimintakykynsä, vaikka eristeen heikossa kohdassa tapahtuisi paikallinen läpilyönti. [31] Paikallisen läpilyönnin aiheuttama sähkövirta höyrystää ohuen metalloinnin vian alueelta ja jättää filmiin reiän, mikä eristää vian ja palauttaa elektrodien välisen eristyksen. [43] Itsekorjautumisen seurauksena kondensaattori menettää pienen määrän kapasitanssia, mutta toistuvana ilmiönä komponentti saavuttaa vähitellen eliniän lopun [31, 39] metalloinnin katoamisen myötä [43]. On esitetty [43], että kondensaattorin kapasitanssi pienenee



likimain lineaarisesti itsekorjautumisen aiheuttamana. Kuvassa 24 havainnollistetaan itsekorjautunutta filmikondensaattoria.



Kuva 24: Itsekorjautuneen metalloidun filmikondensaattorin poikkileikkaus ja itsekorjautunut filmi. [42]



Kuva 25: Koronapurkauksien aiheuttamaa metallon tuhoutumista. [45]

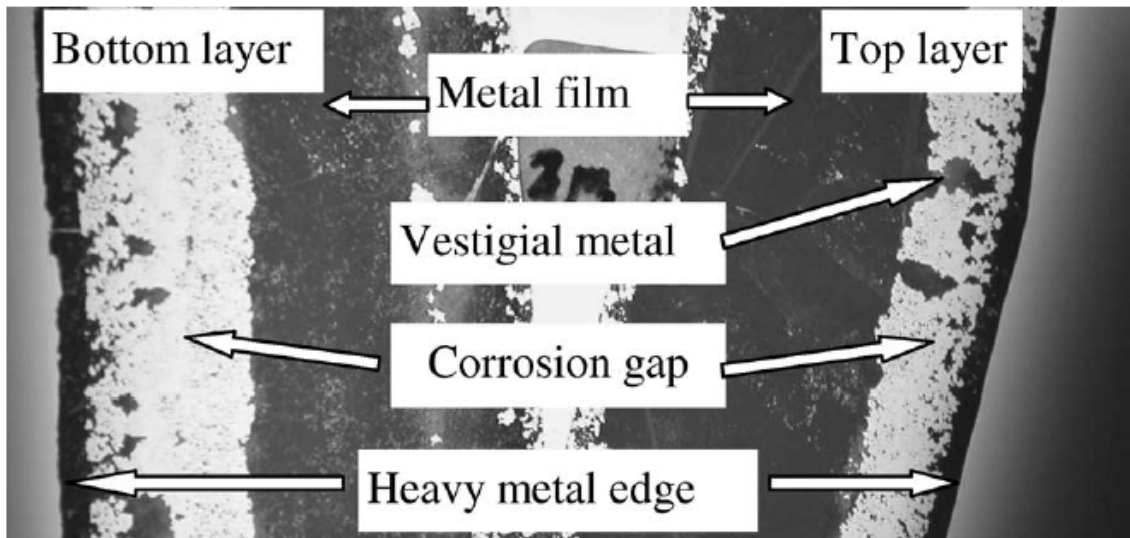


Koronapurkaus, tai toiselta nimeltään osittaispurkaus, on tapahtuma, jossa ilman läpilyöntikestävyyyden ylittäminen aiheuttaa paikallisesti ilman ionisoitumisen ja siten läpilyönnin. Filmikondensaattorin valmistusprosessissa saattaa jäädä ilmakuplia filmikerrosten väliin, jonka takia kondensaattorin sisällä voi tapahtua koronapurkauksia. [42] Läpilyönnin aiheuttama sähkövirta ja lämpö haihduttavat metallon purkausalueelta, jolloin kondensaattori menettää kapasitanssia ja toistuvana ilmiönä saavuttaa eliniän lopun. Pahimmillaan jatkuvat koronapurkaukset voivat vahingoittaa eristettä, jolloin sen läpilyöntikestävyys heikkenee ja voi muodostua oikosulku. [43] Kuvassa 25 esitetään koronapurkauksien aiheuttamia vahinkoja metalloinnille.

Moni tekijä altistaa kondensaattorin koronapurkauksille. Purkaus edellyttää aina ilmaa rakenteessa, ja tilakerrointa (englanniksi *space factor*) käytetäänkin kuvaamaan ilman suhdetta eristeen määrään. Koronapurkaukset alkavat yleensä filmin reunoilta ja etenevät kohti keskustaa, sillä elektrodien välinen sähkökenttä on voimakas reunoilla. [42] Purkaukset ovat lisäksi todennäköisempiä korkeassa lämpötilassa ja pienessä ilmanpaineessa [43] sekä korkeassa kosteudessa [42]. Kondensaattorin rakenteesta johtuen sen ulkoreunoilla on yleensä sisäosia pienempi paine, joten ilmakuplien sisäinen paine on reunoilla pienempi, [43] ja lisäksi ilmankosteus pääsee tunkeutumaan sinne helpommin [31, 44]. Muovikotelointi on metallikotelointia alttiimpi koronapurkauksille, koska muovikotelo ja epoksi päästävät ilmankosteutta läpi [43, 44, 45], eikä epoksi kykene täyttämään filmikerrosten ilmakuplia toisin kuin öljy [43]. Öljyvapaat eli kuivat filmikondensaattorit ovat kasvavassa suosiossa [43, 44].

On esitetty [44, 47, 48], että metalloiduilla filmikondensaattoreilla on kaksi erilaista mekanismia, jotka aiheuttavat korroosiota. Ensimmäistä mekanismia kutsutaan ilmakorroosioksi (englanniksi *atmospheric corrosion*), jossa metallit oksidoiduvat ilmankosteuden ja hapen vaikutuksesta. Myös toisessa korroosiomekanismissa metalli oksidoiduu, mutta tässä tapauksessa kosteuden ja vaihtojännitteen vaikutuksesta. [48] Toista mekanismia voidaan nimittää hieman harhaanjohtavasti vain sähkökemialliseksi korroosioksi, vaikka myös ilmakorroosio on omanlaista sähkökemiallista korroosiota [48]. Jälkimmäistä korroosiota havaitaan vain alle kymmenen kilohertsin taajuuksilla [43] ja riittävällä amplitudilla. Tasajännite tai katkottu tasajännite ei kykene aiheuttamaan tätä korroosiotyyppiä. [48]

Muovikotelointi on metallikotelointia alttiimpi korroosiolle, sillä muovikotelo ja epoksi päästävät ilmankosteutta läpi [43, 44, 45]. Ilmakorroosio etenee tyypillisesti filmin reunoilta keskustaa kohti [44, 48], sillä ilmankosteus pääsee tunkeutumaan reunoille helpommin [31, 44]. Myös AC-jännitteen aiheuttama korroosio alkaa tyypillisesti filmin reunoilta voimakkaamman sähkökentän takia [43]. AC-jännitteen aiheuttama korroosio voi kuitenkin alkaa mistä tahansa kohtaa filmiä, sillä prosessin voivat käynnistää filmin pinnalla olevat virheet [44, 48], jotka voimistavat sähkökenttää paikallisesti [44]. Kuvissa 26 ja 27 esitetään filmin reunoilta ja keskeltä alkavan korroosion aiheuttamia vahinkoja metalloinnille.



Kuva 26: [44] Filmin reunoilta etenevä korroosio.



Kuva 27: [45] Filmin keskeltä alkava korroosio.

Korroosion seurauksena metalloidun filmikondensaattorin elektrodit muuttuvat sähköä johtamattomiksi metallioksideiksi samalla menettäen käyttökelpoista johtavaa pinta-alaa [42, 43]. Korroosion edetessä kondensaattorin kapasitanssi pienenee [42, 43], ja ESR kasvaa [43, 44, 47, 48], kun metallointi ohenee [43] tai filmin keskellä oleva metallointi kytkeytyy päätymetallointiin aiempaa pidempää reittiä [44, 45]. On esitetty [44], että jäännösmetallointilinkit päätymetallointiin (nähdään kuvassa 26)

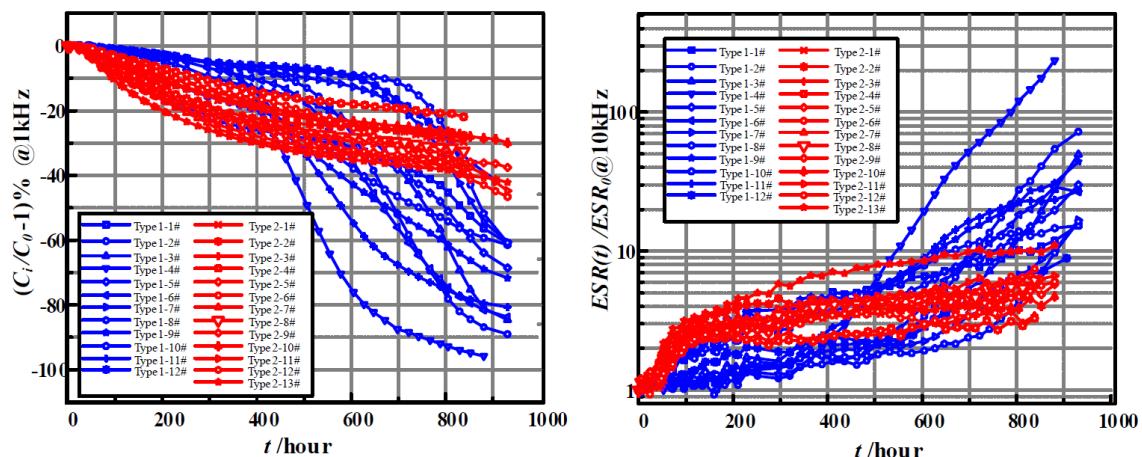
kuumentavat ympäröivää eristefilmiä, ja tämä voi mahdollisesti johtaa katastrofaaliseen vikaan. Paikallinen lämpeneminen voi vahingoittaa eristefilmiä ja aiheuttaa oikosulun tai tulipalon [43].

#### 4.2.2 UPS-laitteen kunnonvalvonnan kannalta kiinnostavat parametrit

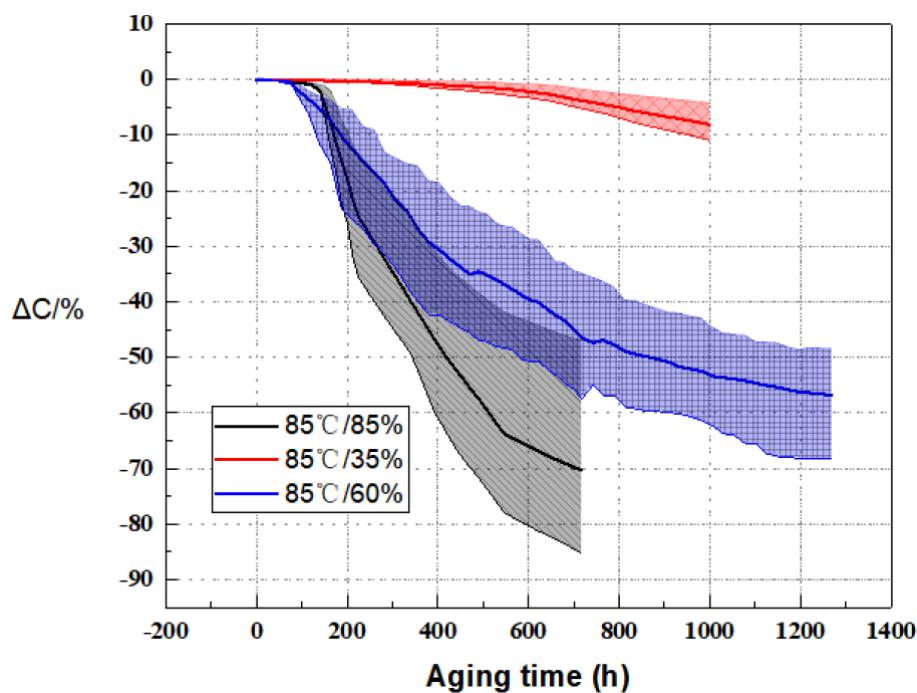
UPS-laitteissa filmikondensaattoreita käytetään tyypillisesti tulon ja lähdön AC-suodatuksen, jossa komponentit altistuvat jatkuvasti vaihtojännitteelle ja -virralle sekä ympäristön kosteudelle ja lämmölle. Lisäksi luvussa 3.2.2 yhdeksi yleisimmäksi UPS-laitteiden vikaantumisten syyksi listattiin tuloverkon transientit, joten erityisesti tulopuolen kondensaattoreihin kohdistuu myös suuria jännitteen muutosnopeuksia ja hetkellisiä ylijännitteitä tai virtapulsseja. Lämpötila, kosteus ja jännite listataan tyypillisesti [31, 42, 43] merkittävimmiksi filmikondensaattorien rasiutustekijöiksi, ja on esitetty [43], että nämä yhdessä voivat johtaa koronapurkauksiin, korroosioon ja päätymetalloinnin kontaktihäiriöihin. Kuvan 23 ja [42] perusteella väliaikaiset ylijännitteet taas lisäävät itsekorjautumisia. Jännitetransientit tai virtapulssit puolestaan rasittavat erityisesti päätymetallointia [42, 43] ja eristefilmiä [42].

Metalloiduilla filmikondensaattoreilla ei ole UPS-sovelluksissa yhtä selvää dominoivaa ikääntymismekanismia, joten on järkevää mitata parametria, joka ottaa mahdollisimman monta todennäköistä vikamekanismia huomioon. Kolmen merkittävän vikaantumismekanismien (itsekorjautumiset, koronapurkaukset ja korroosio) yhteisenä tekijänä on käytettävissä olevan metalloinnin menettäminen [42], joka johtaa kapasitanssin pienenemiseen ja ESR:n kasvamiseen ajan myötä. Onkin esitetty [45], että suurin osa metalloiduista filmikondensaattoreista vikaantuu kapasitanssin menettämisen myötä, minkä lisäksi havaitaan usein kasvanut häviökerroin. On myös esitetty [46], että filmikondensaattorien kunnonvalvonnassa on suositumpaa mitata kapasitanssia ESR:n sijaan, sillä filmikondensaattorien ESR on tyypillisesti pieni.

Metalloitujen filmikondensaattorien kapasitanssin ja ESR:n kehittymistä on tutkittu [47, 48] korkeassa lämpötilassa ja kosteudessa lähellä komponenttien ilmoitettua jännitekestoaa, jolloin pääasiallinen ikääntymismekanismi oli AC-jännitteen aiheuttama korroosio. Nämä testit vastaavat hyvin UPS-laitteen filmikondensaattorien kokemia rasituksia haastavissa ympäristöolosuhteissa ilman hetkellisten ylijännitteiden tai transienttien vaikutusta. Kuvassa 28 esitetään mittaustulokset, joiden mukaan sekä kapasitanssilla että ESR:llä voidaan selvästi havaita korroosion aiheuttamaa metalloinnin menettämistä muovikoteloiduissa MPPF-kondensaattoreissa. Kuvan 28 perusteella kapasitanssin ja ESR:n muutosnopeuksien muutoksissa ei ole merkittävää ajallista eroa, joten kumpaakaan parametria ei voida tässä tapauksessa pitää selvästi toista parempana kunnonvalvonnan näkökulmasta.



Kuva 28: Kahden erityyppisen X2-luokitellun muovi-/epoksikoteloidun MPPF-kondensaattorin kapasitanssin ja ESR:n kehittyminen AC-jännitteellä korkeassa lämpötilassa ja kosteudessa. Testikappaleet ikääntyivät pääasiassa (AC-jännitteen aiheuttaman) sähkökemiallisen korroosion takia, mutta myös muutamia itsekorjautumisia havaittiin. Korroosiota havaittiin sekä filmin ulkoreunoilla että filmin keskellä. [47]



Kuva 29: Metalloidun filmikondensaattorin kapasitanssin kehittyminen eri suhteellisissa ilmankosteuksissa korkeassa lämpötilassa AC-jännite kytkettynä. Testikappaleet ikääntyivät filmin ulkoreunoilla ja keskellä esiintyvän AC-jännitteen aiheuttaman korroosion takia. [48]

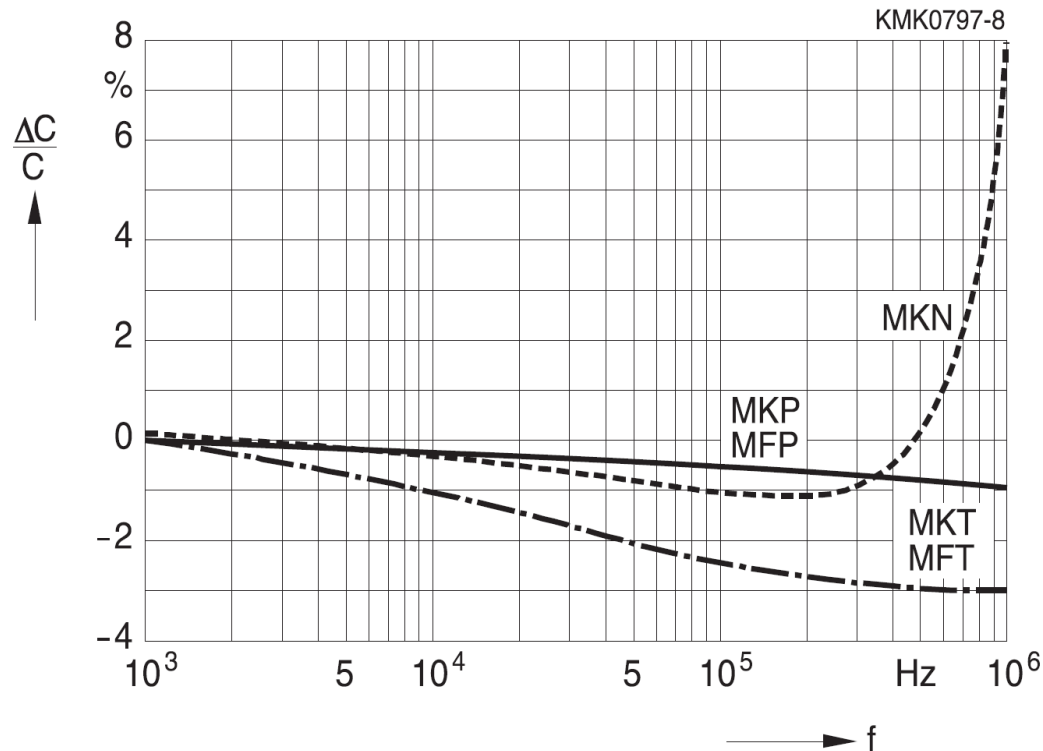
Kuvasta 29 taas nähdään, että ilmankosteus vaikuttaa äärimmäisen voimakkaasti metalloidun filmikondensaattorin kapasitanssin kehittymiseen korkeassa lämpötilassa AC-jännite kytkettynä. Vaikka hetkellinen ilmankosteus ei suoraan kuvaa komponentin kuntoa, on näiden tulosten perusteella kosteuden seuraaminen osana muuta kunnonvalvontaa erittäin kannattavaa. Tutkimuksessa [48] huomautetaan, että absoluuttinen ilmankosteus on suhteellista ilmankosteutta mielekkäämpi kosteuden mittari. Esimerkiksi normaaleissa laboratorio-olosuhteissa (20 °C, 60 % suhteellinen ilmankosteus) ilma sisältää kosteutta 14 g/m<sup>3</sup>, kun taas 85 °C:n lämpötilassa samassa suhteellisessa kosteudessa se sisältää 284 g/m<sup>3</sup>. [48]

On esitetty [42], että häviökertoimen (ESR:n) kasvaminen on merkki erityisesti korroosiosta ja päätymetalloinnin irtoamisesta, mutta [43] kuitenkin esittää, että suora häviökertoimen (ESR:n) mittaaminen ei mittaa riittävällä tarkkuudella päätymetalloinnin rappeutumista. Koska kapasitanssin pienenemisellä voidaan havaita yhtä aikaisin ESR:ää useampia todennäköisiä vikamekanismeja (korroosio, koronapurkaukset ja itsekorjautuminen [42]), on kapasitanssi selvästi ylivoimainen parametri metalloidun filmikondensaattorin kunnonvalvontaan. Pelkkään kapasitanssin mittaamiseen perustuva kunnonvalvonta ei kuitenkaan ole täysin kattava, koska se ei havaitse päätymetalloinnin rappeutumista, jota [43] pitää yhtenä merkittävänä vikamekanismina.

#### 4.2.3 Mittausolosuhteiden vaikutukset

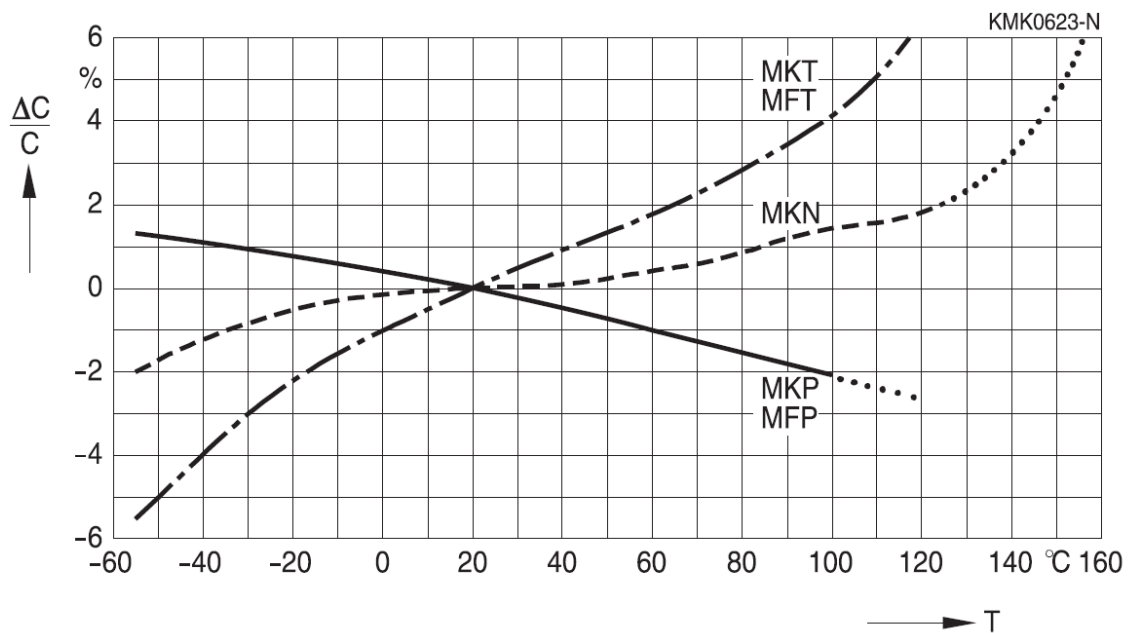
Filmikondensaattorien kunnonvalvonnassa mitattuun kapasitanssiin voi vaikuttaa kosteus, lämpötila ja mittaustaajuus. Voimakkaasti vaihtelevissa olosuhteissa saadut mittaustulokset eivät siis välttämättä ole vertailukelpoisia keskenään, ellei kosteuden, lämpötilan ja mittaustaajuuden vaikutuksia huomioida. Kuvissa 30 – 32 havainnollistetaan näiden olosuhteiden vaikutuksia erilaisille filmikondensaattoreille. Kuvissa MKP/MKF edustaa polypropeenifilmikondensaattorien ominaisuuksia, jotka ovat erityisen mielenkiinnon kohteena tässä diplomityössä, kuten luvussa 4.2 todetaan.

Kuvasta 30 nähdään, että mittaustaajuudella ei juurikaan ole vaikutusta MPPF-kondensaattorin mitattuun kapasitanssiin alle megahertsin tajuuksilla [27]. Koko esitetyllä taajuusalueella 1 kHz – 1 MHz MPPF-kondensaattorin mitattu kapasitanssi vaihtelee vain noin prosentin. Muilla eristeillä vaikutus on huomattavasti voimakkaampi.

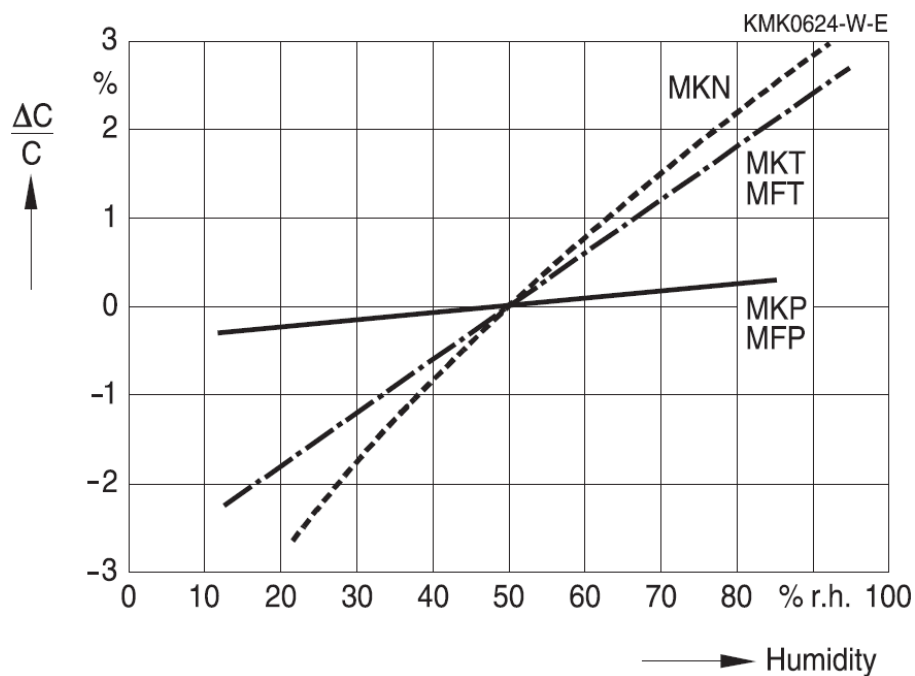


Kuva 30: Filmikondensaattorien mitatun kapasitanssin tyypillinen riippuvuus mitaustaajuudesta. MKP/MPF: polypropeeni (PP), MKT/MFT: polyeteenitereftalaatti (PET), MKN: polyeteeninaftalaatti (PEN). [27]

Kuvista 31 ja 32 nähdään, että lämpötilan ja suhteellisen ilmankosteuden muutokset eivät vaikuta kovin voimakkaasti MPPF-kondensaattorien mitattuun kapasitanssiin. Polypropeeni sietää kuvien perusteella kosteutta selvästi muita eristeitä paremmin. Lämpötilalla onkin kuvien perusteella selvästi kosteutta suurempi vaikutus MPPF-kondensaattoreihin, mutta esimerkiksi laajalla  $20 - 80\text{ °C}$  alueella mitattu kapasitanssi vaihtelee silti vain noin 1,6 prosenttia. Suhteellisen ilmankosteuden vaikutus mitattuun kapasitanssiin on koko esitetyllä mittausalueella vain noin 0,5 prosenttia, mutta yli 85 %:n suhteellisessa kosteudessa muutokset kapasitanssissa voivat olla suurempia [27]. Valitettavasti kuvassa 32 käytettyä mittauslämpötilaa ei ilmoiteta, sillä kuten luvussa 4.2.2 esitetään, on lämpötilalla voimakas vaikutus absoluuttiseen ilmankosteuteen. Todellisuudessa suhteellisen ilmankosteuden muutoksilla voi siis korkeassa lämpötilassa olla esitettyä isompi vaikutus.



Kuva 31: Lämpötilan tyypillinen vaikutus filmikondensaattorien kapasitanssiin. MKP/MPF: polypropeeni (PP), MKT/MFT: polyeteenitereftalaatti (PET), MKN: polyeteeninaftalaatti (PEN). [27]



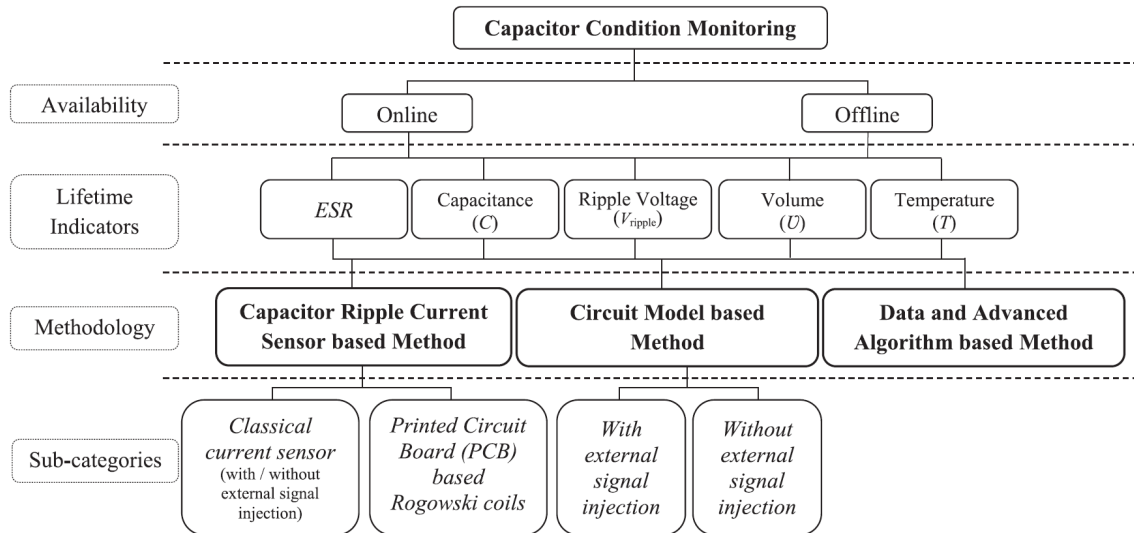
Kuva 32: Suhteellisen ilmastosteuden tyypillinen vaikutus filmikondensaattorien kapasitanssiin. MKP/MPF: polypropeeni (PP), MKT/MFT: polyeteenitereftalaatti (PET), MKN: polyeteeninaftalaatti (PEN). [27]



## 5 Kondensaattorien kunnonvalvonta

Edellisessä luvussa tutkittiin UPS-laitteen kunnonvalvonnan kannalta kaikkein kiinnostavimpien komponenttien eli välipiiri- ja AC-suodatuskondensaattorien toimintaa, vikaantumista ja vikaantumista ennakoivia parametreja. Luvussa kapasitanssi ja ESR todetaan kiinnostavimmiksi kunnonvalvonnan parametreiksi välipiirin elektrolyyttikondensaattoreille, kun taas AC-suodattimien metalloiduille filmikondensaattoreille parhaimmaksi parametriksi todetaan kapasitanssi. Tämän luvun tarkoituksena on puolestaan selvittää ja kuvata tunnettuja menetelmiä, joilla kiinnostavia kunnonvalvontaparametreja voidaan mitata näistä komponenteista UPS-laitteesta. Luvussa vertaillaan löydettyjä menetelmiä ja arvioidaan niiden toteutettavuutta käytännössä.

Vuonna 2016 on tutkittu [46] tarjolla olevia relevantteja kunnonvalvontamenetelmiä suuntaajien kondensaattoreille. Tutkimuksessa kerrotaan, että kehitettyjä teknologioita hyödynnetään harvoin teollisuuden sovelluksissa erityisesti monimutkaisuuden ja korkean hinnan takia. Tästä syystä tutkimuksessa muun muassa vertaillaan eri kunnonvalvontamenetelmiä ja annetaan ehdotuksia, joilla voitaisiin edistää kondensaattorien kunnonvalvontaa käytännön sovelluksissa. Tutkimuksen mukaan suurin osa kondensaattorien kunnonvalvontamenetelmistä perustuu kapasitanssin ja ESR:n estimointiin, ja tutkimus kuvaakin vain näiden parametrien mittaamenetelmiä. Tutkimus käsittelee valitettavasti vain kahta eri menetelmää AC-suodatuskondensaattoreille, ja se keskittyy siis pääasiassa välipiirikondensaattoreihin.



Kuva 33: Kondensaattorien kunnonvalvonnan indikaattorit ja menetelmät [46]. Kirjassa [9] esitetään lähes vastaava kuva, jossa mainitaan kaksi lisäindikaattoria: eriste-resistanssi ja massa.

Kuvassa 33 esitetään tutkimuksessa [46] käytetty kondensaattorien kunnonvalvontamenetelmien luokittelu, jonka mukaan menetelmät voidaan jakaa kolmeen pääryhmään (kuvassa 33 ryhmät I, II ja III vasemmalta oikealle rivillä *Methodology*).



Ryhmässä I mitataan kondensaattorin sykkeisyysvirtaa suoraan sensorilla, kun taas ryhmässä II tätä virtaa estimoidaan epäsuorasti suuntaajan toimintaperiaatteen pohjalta. Ryhmässä III suuntaajajärjestelmää pidetään (täysin tai osittain) mustana laatikkona, eli suuntaajan sisäiset ominaisuudet oletetaan tuntemattomiksi. Erilaisten algoritmien tuottamien mallien avulla kyetään löytämään mitattujen ja estimoitavien parametrien väliset riippuvuussuhteet, jolloin estimoitavia parametreja ei tarvitse mitata suoraan.

Tutkimus [46] ei esitä yksiselitteisesti parhaita menetelmiä kunnonvalvonnan toteuttamiseksi, mutta se antaa useita kiinnostavia huomautuksia ja suosituksia:

- Ryhmän III menetelmät ovat I ja II ryhmän menetelmiä tarkempia.
- Suurin osa menetelmistä kuuluu ryhmään I.
- Suurin osa menetelmistä on käytönaikaisia (online-tyyppisiä). Koska kondensaattorit ikääntyvät tyypillisesti hitaasti, voisivat offline-tyyppiset menetelmät olla riittäviä useimmissa sovelluksissa. Tämän seurauksena voitaisiin hyödyntää paljon yksinkertaisempia estimointimenetelmiä esimerkiksi laitteen käynnistysen yhteydessä.
- Ryhmän I menetelmät eivät ole teollisuuden käytännön sovelluksissa houkuttelevia ylimääräisten komponenttien, hinnan ja luotettavuusongelmien takia.
- Ohjelmistopohjaiset ja olemassa oleviin signaaleihin perustuvat menetelmät, jotka eivät lisää komponentteja ja siten hintaa laitteisiin, voisivat olla houkuttelevia teollisuuden sovelluksissa.
- Ohjelmistopohjaisia ratkaisuja voidaan soveltaa sekä uusiin että olemassa oleviin laitteisiin ohjelmistopäivityksillä, ja jatkuvan laskennan halpenemisen myötä menetelmät muuttuvat entistäkin kiinnostavimmiksi tulevaisuudessa.
- Edulliset ja matalan induktanssin virtasensorit voisivat nostaa ryhmän I menetelmien houkuttelevuutta tulevaisuudessa.

Näiden suositusten pohjalta etsittiin tämän diplomityön aikana UPS-laitteelle soveltuvia välipiiri- ja AC-suodatuskondensaattorien kunnonvalvontamenetelmiä, jotka hyödyntävät luvussa 4 parhaiksi todettuja parametreja. Koska aiemmassa tutkimuksessa [46] esitellään vuoteen 2015 asti laajaa joukkoa erilaisia menetelmiä, etsittiin tämän työn aikana erityisesti vuoden 2015 jälkeen ilmestyneitä julkaisuja. Diplomityön aikana löydettiin useita välipiirikondensaattorin valvontamenetelmiä, mutta rajallisen ajan vuoksi vain muutamaa eri menetelmää vertaillaan yksityiskohdaisesti. AC-suodatuskondensaattorien osalta työn aikana löydettiin vain vuonna 2016 valmistunut aihetta käsittelevä diplomityö sekä yksi uusi julkaisu, joten näiden tuloksia vertaillaan tässä työssä.

Taulukko 1: Välipiirikondensaattorin kunnonvalvontamenetelmien vertailu.

Käytetty menetelmä	Merkittävät hyödyt	Merkittävät haitat	Ilmoitettu mittavirhe
[49]: Kapasitanssi ja ESR lasketaan välipiirijännitteestä mitatuista kondensaattorin purkautumisajoista ulkoisten transistoriohjattujen vastusten avulla.	Mittaa sekä kapasitanssia että ESR:ää. Olemassa olevia laitteita ei tarvitse muuttaa. Yksinkertainen toteuttaa.	Vaatii uusia komponentteja laitteeseen. Keskeyttää laitteen normaalin toiminnan mittauksen ajaksi.	<i>Simuloitu</i> C: <0,05%, ESR: <1,3% <i>Kokeiltu</i> C: <2,6%, ESR: <2,8%
[50]: Kapasitanssi estimoidaan koulutetun neuroverkon avulla suuntaajan lähtövirrasta ja välipiirijännitteen sykkeisyydestä.	Olemassa olevia laitteita ei tarvitse muuttaa. Ei vaadi ollenkaan uusia komponentteja, jos laitteen olemassa olevat laskentaressurit riittävät. Erittäin yksinkertainen toteuttaa, kun neuroverkko on koulutettu. Mahdollisuus korkeaan tarkkuuteen.	Neuroverkon kouluttaminen on työlästä ja erimalliset laitteet vaativat todennäköisesti omat neuroverkkonsa. Mittavirhe kasvaa, jos laite ei ole neuroverkolle koulutetussa tilassa. Virhe voi kasvaa pitkällä ajanjaksolla, kun muut osat laitteessa ikääntyvät.	<i>Kokeiltu</i> C: <0,5%
[51]: ESR laskeaan oikosulkemalla vaihtosuuntaajan puolisoltilta ja mittaamalla välipiirijännitteen muutosta sekä puolisoltilan virtaa.	Mittaa yhtä aikaa välipiirikondensaattorin ja vaihtosuuntaajan IGBT:iden kuntoa.	Vaatii muutoksia vaihtosuuntaajan hilaohjaimiin. Puolisiltoihin tarvitaan virtamittarit oikosulkuvirran mittaamiseksi. Keskeyttää laitteen normaalin toiminnan mittauksen ajaksi.	<i>Kokeiltu</i> ESR: 6%

## 5.1 Välipiirikondensaattori

Taulukossa 1 esitellään tämän diplomityön aikana löydetyistä välipiirikondensaattorin kunnonvalvontamenetelmistä mielenkiintoisimmat. [49]:n ja [50]:n menetelmät valikoitiin tarkempaan vertailuun erityisesti, koska ne perustuvat UPS-laitteen olemassa oleviin signaaleihin sekä ovat yksinkertaisia ja siten mahdollisesti edullisia toteuttaa. [51]:n menetelmä herätti mielenkiinnon yhdistämällä samaan menetelmään

välipiirikondensaattorien ja IGBT:iden kunnonvalvonnan.

Kondensaattorin purkautumisaikaan perustuva menetelmä [49] on erittäin yksinkertainen toteuttaa ja sen ainoa suuri heikkous on muutaman ylimääräisen komponentin tarve. Neuroverkkoihin perustuvalla menetelmällä [50] on puolestaan mahdollista päästä erittäin suureen tarkkuuteen ilman ylimääräisiä komponentteja, mutta tämän menetelmän käyttöönotto voi olla äärimmäisen työlästä. Oikosulkuvirtaan perustuvan metodin [51] merkittävä hyöty on, että se väitetyesti valvoo sekä välipiirikondensaattorin että vaihtosuuntaajan IGBT:eitä samanaikaisesti. Oikosulkuvirtamenetelmällä on kuitenkin merkittäviä heikkouksia verrattuna purkautumisaikaan ja neuroverkkoihin perustuviin menetelmiin, sillä tämän menetelmän hyödyntäminen vaatisi uusia sensoreita ja muutoksia olemassa oleviin laitteisiin sen ollessa myös epätarkka. Diplomityön luvussa 3.2 havaittiin osittaista kiinnostusta toteuttaa kunnonvalvontaa tasa- ja vaihtosuuntaajien IGBT:eille, mutta oikosulkuvirtamenetelmän toimivuus esitellään vain vaihtosuuntaajalle. Näiden merkittävien haittapuolien vuoksi oikosulkuvirtamenetelmä ei vaikuta houkuttelevalta.

Kondensaattorin purkautumisaikaan perustuva menetelmä vaikuttaa vertailluista menetelmistä kaikkein kiinnostavimmalta erityisesti, koska tämän menetelmän käyttöönotto voidaan toteuttaa erittäin suoraviivaisesti ilman suuria haittapuolia. Neuroverkkomenetelmän suurinta ongelmaa eli neuroverkon kouluttamisen vaativuutta ei voida varmentaa tämän diplomityön puitteissa, joten kehitystyökustannusten osalta vähäriskisempi purkautumisaikaan perustuva menetelmä on houkuttelevampi huolimatta suuremmista komponenttikustannuksista. Purkautumisaikaan perustuvan menetelmän komponenttikustannuksia voidaan lisäksi madaltaa julkaistusta muodosta hylkäämällä ESR:n mittaamiseen tarvittavat komponentit, jolloin menetelmä mittaa pelkästään kapasitanssia.

Diplomityön aikana keksittiin, että UPS-laitteen välipiiriin kytkettyjä kuormia (esimerkiksi apuvirtalähteet) voitaisiin mahdollisesti hyödyntää ulkoisten transistorihjattujen vastusten sijasta, jolloin kondensaattorin purkautumisaikaan perustuvan menetelmän suurimmasta heikkoudesta päästään eroon. Tämän diplomityön suosituksena onkin, että menetelmän [49] toimivuus tulisi varmentaa UPS-laitteen omia sisäisiä kuormia käyttäen.

Esitetyn vertailun perusteella parhaimmaksi UPS-laitteen välipiirikondensaattorien kunnonvalvontamenetelmäksi todetaan tässä diplomityössä [49]:n esittämä kondensaattorin purkautumisaikoihin perustuva menetelmä.

## 5.2 AC-suodatuskondensaattori

AC-suodatuskondensaattorien kunnonvalvontamenetelmiä on tutkittu [52] sähkökäytön LCL-suodattimen metalloiduille filmikondensaattoreille tuoreessa diplomityössä vuodelta 2016. Tämän diplomityön aikana löydettiin vain yksi uusi [53] kiinnostuksen herättänyt AC-suodatuskondensaattorien kunnonvalvontamenetelmä, jota ei ollut vielä saatavilla aiemman diplomityön aikana. Koska muita relevantteja menetelmiä ei löydetty, ja aiemman diplomityön tulokset ovat hyvin sovellettavissa UPS-laitteille, keskitytään tässä työssä vertailemaan aiemman työn parasta menetelmää löydettyyn uuteen menetelmään.

Aiemmassa työssä [52] vertaillaan neljää erilaista kapasitanssin mittaamiseen perustuvaa kunnonvalvontamenetelmää, joista yksi täysin uusi menetelmä kehitettiin ja testattiin työn aikana. Menetelmien vertailussa painotetaan eniten suunnittelu- kriteereitä eli käytännössä ratkaisun monimutkaisuutta ja hintaa, kun toissijaisina kriteereinä pidetään menetelmän mittatarkkuutta ja käytönaikaisuutta. Nämä painotukset ovat hyvin linjassa luvun 5 alussa esitettyjen tietojen pohjalta. Käytetyillä painotuksilla työssä kehitetty menetelmä todetaan parhaimmaksi tutkitusta joukosta.

Diplomityössä [52] esitetyssä menetelmässä LCL-suodattimesta muodostetaan LC-sarjaresonanssiipiiri irrottamalla suuntaajajärjestelmä verkosta ja ohjaamalla suuntaajan transistoreja sopivasti. Resonoivan piirin resonanssitaajuus voidaan selvittää vaihevirroista joko nopean Fourier-muunnoksen (FFT – Fast Fourier Transform) avulla tai resonanssin jaksonajasta. Jaksonaika voidaan mitata helposti esimerkiksi resonoivan virran nollakohdista tai huipuista. Kun resonanssitaajuuden lisäksi suodatimen induktanssi tiedetään, voidaan suodatimen kapasitanssi laskea yksinkertaisesti LC-sarjaresonanssitaajuuden yhtälöstä (9).

Aiemman diplomityön LC-resonanssimenetelmällä [52] on useita merkittäviä hyötyjä ilman suurempia haittoja. Menetelmää voidaan helposti soveltaa olemassa oleville laitteille, sillä se ei vaadi lainkaan uusia komponentteja. Menetelmä soveltuu sekä tulo- että lähtösuodattimien kapasitanssin estimointiin, ja suoritettut mittaukset ovat yksinkertaisia. Ilmoitettu simuloitu ja testattu estimointivirhe  $< 1 \%$  on pieni. Haittapuolina on, että menetelmä ei ole käytönaikainen, eli laitteen normaali toiminta pitää keskeyttää mittausten ajaksi, ja että suodatininduktanssien arvojen mahdolliset variaatiot vaikuttavat estimointivirheeseen.

Tässä diplomityössä löydettyä uutta menetelmää [53] voidaan väitetyesti hyödyntää liitännäisenä kaikille tyypillisille pulssinleveysmodulaatiota (PWM – Pulse Width Modulation) hyödyntäville suuntaajien säätöjärjestelmille. Menetelmässä injektoidaan suuntaajan säätöjärjestelmän jännitereferenssiin herätesignaali, jonka avulla verkkoon kytketyn LCL-suodatimen kapasitanssi ja induktanssit voidaan laskea suuntaajajärjestelmän matemaattisesta mallista mittaamalla vaihevirtoja sekä välipiirin jännitettä.

Herätesignaalin injektointiin perustuva menetelmä [53] ei vakuuta tutkimuksessa esitellyssä muodossa verrattuna LC-resonanssimenetelmään. Menetelmän selvinä etuina on, että sitä voidaan hyödyntää olemassa oleville laitteille ilman uusia komponentteja ja lisäksi käytönaikaisesti häiritsemättä laitteen normaalia toimintaa. Menetelmä mittaa kapasitanssin lisäksi myös suodatimen induktansseja, mutta tässä diplomityössä ei löydetty selvää kiinnostusta toteuttaa kunnonvalvontaa UPS-laitteen tulo- tai lähtösuodattimien keloille, joten tämä hyöty on kyseenalainen. Käytännön testeissä estimointivirheiksi ilmoitettiin  $12 \%$ :a kapasitanssille,  $2 \%$ :a suuntaajan puoleiselle ja  $8 \%$ :a verkon puoleiselle induktanssille. Suuren virheen lisäksi menetelmän toimivuus varmennetaan tutkimuksessa vain verkkoon kytketylle suodattimelle, joten toimivuus pitäisi erikseen varmentaa lähtösuodattimelle.

Esitetyn vertailun perusteella [52]:n esittämä LC-resonanssimenetelmä todetaan tässä diplomityössä parhaimmaksi kunnonvalvontamenetelmäksi UPS-laitteen AC-suodatuskondensaattoreille.

## 6 Yhteenveto

Kunterustaista kunnossapitoa ja kunnonvalvontaa käsitellään kirjallisuudessa tyyppillisesti joko abstraktilla järjestelmätasolla tai erilaisten suuntaajajärjestelmien yksittäisille komponenteille, mutta ei kokonaisuutena UPS-laitteille. Kunterustaisen kunnossapidon avulla kunnossapitokuluja voidaan madaltaa luotettavuuden kärsimättä, joten tässä diplomityössä tutkitaan kirjallisuuskatsauksena kunnonvalvonnan toteuttamista kaksoismuunnos-UPS-laitteelle tehokkaan kunterustaisen kunnossapidon mahdollistamiseksi. Laajan kokonaisuuden vuoksi diplomityön aikana ei toteuteta kunnonvalvontaa käytännössä, vaan työssä pyritään löytämään parhaat mahdolliset kunnonvalvontamenetelmät sopiville UPS-laitteen komponenteille.

Tässä työssä tutustutaan aluksi kunnossapidon ja kunnonvalvonnan perusteisiin, ja havaitaan, että kunterustainen kunnossapito on erityisen houkutteleva kunnossapitostrategia monimutkaisille ja korkean luotettavuuden UPS-laitteille. Käytännöllisessä kunterustaisessa kunnossapidossa tulee käyttää kunnonvalvontaa, jolla järjestelmän tulevia vikoja pyritään ennakoimaan mahdollisimman aikaisin mitatuista parametreista. Työssä esitetään standardoitu kunnonvalvonnan toteuttamisen prosessikaavio, jonka avulla sopivat kunnonvalvontamenetelmät löydetään myöhemmin tässä työssä.

Seuraavaksi työssä perehdytään kaksoismuunnos-UPS-laitteen tyyppilliseen rakenteeseen, toimintaan ja komponentteihin. Kun UPS-laitteen funktio ja sen komponentit on tunnistettu, selvitetään aiempien tutkimusten ja yritysten julkaisujen avulla UPS-laitteen kiinnostavimmat komponentit kunnonvalvonnan kannalta. Kondensaattorit ovat erityisen vikaherkkiä komponentteja UPS-laitteissa, joten niille on kannattavaa toteuttaa kunnonvalvontaa. Myös tasa- ja vaihtosuuntaajan puolijohteet, akusto sekä jäähdytysjärjestelmän komponentit osoittavat potentiaalia, mutta diplomityön rajallisuuden vuoksi työssä päätetään keskittyä vain kondensaattoreihin.

Työssä tutustutaan UPS-laitteen välipiirille ja AC-suodattimille tyyppisten alumiinielektrolyytti- ja filmikondensaattorien toimintaan, ominaisuuksiin ja erityisesti niiden vikaantumiseen sopivien kunnonvalvontaparametrien löytämiseksi. Esitetyn analyysin perusteella alumiinielektrolyyttikondensaattorin kiinnostavimmat parametrit ovat kapasitanssi ja ESR, jotka linkittyvät suoraan komponentin dominoivaan vikamekanismiin UPS-laitteen välipiirissä eli elektrolyytin haihtumiseen. Näistä kahdesta ESR todetaan hieman kiinnostavammaksi kunnonvalvontaparametriksi, sillä löydettyssä ikäännytystestissä ESR:ssä havaitaan muutoksia hieman ennen kapasitanssia. Alumiinielektrolyyttikondensaattorin mitattu ESR ja kapasitanssi voivat vaihdella merkittävästi lämpötilan ja mittaustaajuuden muuttuessa.

UPS-laitteen AC-suodatuksessa käytetään tyyppisesti metalloituja polypropeenifilmikondensaattoreita, joten työ keskittyy erityisesti tämän kondensaattorityypin ominaisuuksiin ja vikaantumiseen. MPPF-kondensaattorilla on neljä pääasiallista vikamekanismia (itsekorjautuvuus, koronapurkaukset, korroosio ja päätymetalloinnin rappeutuminen), joiden seuraukset komponentille esitetään. Työssä ei löydetä yhtä selvää dominoivaa vikamekanismia, mutta kolmen pääasiallisen mekanismin seurauksena metalloitu kondensaattori menettää metallointia, ja tästä päätellään, että kapasitanssi on paras parametri MPPF-kondensaattorin kunnonvalvontaan.

MPPF-kondensaattorin mitattu kapasitanssi ei juurikaan vaihteile ilmankosteuden, lämpötilan tai taajuuden muuttuessa.

Lopulta esitellään mielenkiintoisimmat diplomityön aikana löydetyt välipiiri- ja AC-suodatuskondensaattorien kunnonvalvontamenetelmät ja niiden vertailu. Aluksi työssä esitetään aiemmassa tutkimuksessa käytetty kondensaattorien kunnonvalvontamenetelmien luokittelu sekä nostetaan esille menetelmiin liittyviä huomautuksia ja suosituksia, joiden pohjalta vuoden 2015 jälkeen julkaistuja menetelmiä etsitään ja vertaillaan. Vertailun tuloksena löydetään kaikkein kiinnostavimmat kunnonvalvontamenetelmät kaksoismuunnos-UPS-laitteen välipiiri- ja AC-suodatuskondensaattoreille sekä ehdotetaan jatkotutkimuksia parhaimmaksi todetun välipiirikondensaattorien menetelmän parantamiseksi.

Tämän diplomityön suosituksena on, että parhaiksi todetut kondensaattorien kunnonvalvontamenetelmät tulisi käyttöönottaa seuraamalla työssä esitettyä standardoitua prosessia. Tämä edellyttää esimerkiksi sopivien EOL-kriteerien selvittämistä ja kunnonvalvontaparametrien kehittymistä kuvaavien mallien tutkimista, jotta komponenttien vikaantumisajankohtaa voitaisiin arvioida tehokkaasti. Lisäksi diplomityön rajallisuuden vuoksi työstä on rajattu pois komponentteja, joille kunnonvalvonnan toteuttaminen voisi olla kannattavaa. On siis suositeltavaa, että erityisesti UPS-laitteen tasa- ja vaihtosuuntaajan puolijohteiden, akustojen ja jäähdytysjärjestelmän komponenttien kunnonvalvontaa tutkittaisiin tulevaisuudessa.

## Viitteet

- [1] Aro, M. *Sähkölaitteiden kunnonvalvonta*. Espoo: Teknillinen korkeakoulu, Suurjännitetekniikan laboratorio, 1998.
- [2] Kim, N-H. & An, D. & Choi, J-H. *Prognostics and Health Management of Engineering Systems: An Introduction*. Sveitsi: Springer, 2017. DOI 10.1007/978-3-319-44742-1.
- [3] Vachtsevanos, G. & Lewis, F. & Roemer, M. & Hess, A. & Wu, B. *Intelligent Fault Diagnosis and Prognosis for Engineering Systems*. Hoboken, New Jersey: Wiley, 2006. ISBN 978-0-471-72999-0.
- [4] ISO 13372:2012. Toinen painos. Condition monitoring and diagnostics of machines – Vocabulary. Sveitsi: ISO, 2012.
- [5] Eaton Corporation. The Benefits of a Preventive Maintenance Service Plan for your UPS. [Verkkodokumentti]. 2009. Saatavissa: <https://www.eaton.com/content/dam/eaton/markets/healthcare/knowledge-center/white-paper/the-benefits-of-a-preventive-maintenance-service-plan-for-your-UPS.pdf>. [Viitattu 24.04.2019].
- [6] Eaton Corporation. Component Life Cycle Replacement Schedule (Power Xpert 9395 225-1100 kVA). Syyskuu 2016.
- [7] Eaton Corporation. Component Life Cycle Replacement Schedule (Eaton 93PM 30-500 kVA). Elokuu 2017.
- [8] Eaton Corporation. Component Life Cycle Replacement Schedule (Eaton 93PS 8-40 kVA). Syyskuu 2016.
- [9] Chung, H. & Wang, H. & Blaabjerg, F. & Pecht, M. *Reliability of Power Electronic Converter Systems*. Lontoo: Institution of Engineering and Technology, 2016. ISBN 978-1-84919-902-5 (PDF).
- [10] ISO 17359:2018. Kolmas painos. Condition monitoring and diagnostics of machines – General guidelines. Sveitsi: ISO, 2018.
- [11] TDK/EPCOS. EPCOS Product Profile 2012: Film Capacitors for Industrial Applications. [Verkkodokumentti]. 2012. Saatavissa: <https://www.tdk-electronics.tdk.com/download/173546/fc030f0de8e3c68b1d9fe2719d353130/film-capacitors-for-industrial-applications-pp.pdf>. [Viitattu 20.06.2019].
- [12] KEMET. 900 Series Safety Disk Capacitors – Product Training Module. [Verkkodokumentti]. Saatavissa: <http://www.kemet.com/Lists/FileStore/900%20Series%20Product%20Training%20Module.pdf>. [Viitattu 01.07.2019].

- [13] Emadi, A. & Nasiri, A. & Bekiarov, S. *Uninterruptible Power Supplies and Active Filters*. USA: CRC Press, 2005. ISBN 0-8493-3035-1.
- [14] Yang, S & Bryant, A & Mawby, P. & Xiang, D. & Ran, L & Tavner, P. An Industry-Based Survey of Reliability in Power Electronic Converters, *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 47, no. 3, s. 1441 - 1451, 2011. DOI 10.1109/TIA.2011.2124436.
- [15] Wolfgang, E. Examples for Failures in Power Electronics Systems, *ECPE Tutorial on Reliability of Power Electronic Systems*, Nürnberg, Saksa, Huhtikuu 2007.
- [16] Wang, H. & Zhou, D & Blaabjerg, F. A Reliability-Oriented Design Method for Power Electronic Converters, *Twenty-Eighth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, 2013. DOI 10.1109/APEC.2013.6520713.
- [17] Falck, J & Felgemacher, C. & Rojko A. & Liserre, M. & Zacharias, P. Reliability of Power Electronic Systems: An Industry Perspective, *IEEE Industrial Electronics Magazine*, vol. 12:2, s. 24 - 35, 2018. DOI 10.1109/MIE.2018.2825481.
- [18] Mulligan, A. UPS Service Plans: How to Maximize Your Returns. [Verkkodokumentti]. Raleigh, USA: Eaton Corporation, 2010. Saatavissa: [http://www.eaton.com/ecm/idcplg%3FIdcService%3DGET\\_FILE%26allowInterrupt%3D1%26RevisionSelectionMethod%3DLatestReleased%26Rendition%3DPrimary%26dDocName%3DPCT\\_240742](http://www.eaton.com/ecm/idcplg%3FIdcService%3DGET_FILE%26allowInterrupt%3D1%26RevisionSelectionMethod%3DLatestReleased%26Rendition%3DPrimary%26dDocName%3DPCT_240742). [Viitattu 24.04.2019].
- [19] Solis, J. Single Phase UPS Management, Maintenance, and Lifecycle. [Verkkodokumentti]. Schneider Electric, 2014. Saatavissa: [https://www.apc.com/salestools/VAVR-9MNSWC/VAVR-9MNSWC\\_RO\\_EN.pdf](https://www.apc.com/salestools/VAVR-9MNSWC/VAVR-9MNSWC_RO_EN.pdf). [Viitattu 26.02.2019].
- [20] Samstad, J. Technical Comparison of On-line vs. Line-interactive UPS designs. [Verkkodokumentti]. Schneider Electric, 2011. Saatavissa: [https://www.apc.com/salestools/JSII-5YQSBR/JSII-5YQSBR\\_R1\\_EN.pdf](https://www.apc.com/salestools/JSII-5YQSBR/JSII-5YQSBR_R1_EN.pdf). [Viitattu 02.04.2019].
- [21] Soltau, A. ABB Drives Lifecycle Preventive Maintenance. [Verkkodokumentti]. ABB Group, 2012. Saatavissa: [https://library.e.abb.com/public/a2e877890bb9154a85257a8500712cb2/3BUS095659\\_Drives\\_Lifecycle.pdf](https://library.e.abb.com/public/a2e877890bb9154a85257a8500712cb2/3BUS095659_Drives_Lifecycle.pdf). [Viitattu 26.02.2019].
- [22] Mulligan, A. Choosing a UPS service Plan. [Verkkodokumentti]. Raleigh, USA: Eaton Corporation, 2013. Saatavissa: <https://www.eaton.com/content/dam/eaton/markets/data-center/Choosing-a-UPS-service-plan.pdf>. [Viitattu 24.04.2019].
- [23] Albasser, M. Maintenance Concept for ABB UPSs - Maintenance Plan and Preventive Replacement Material. [Verkkodokumentti]. ABB Power Protection, 2016. Saatavissa: [http://www.ups-service.by/PDF/Maintenance%20Concept%20ABB%20UPSs\\_July2016.pdf](http://www.ups-service.by/PDF/Maintenance%20Concept%20ABB%20UPSs_July2016.pdf). [Viitattu 26.02.2019].



- [24] ABB. Maintenance Schedule ACS800 single drive and multidrive (manufactured or maintained 2017 and onwards). [Verkkodokumentti]. Maaliskuu 2018. Saatavissa: [https://library.e.abb.com/public/2a18100fcfbd4d41a2fe1963141d32f2/Maintenance\\_schedule\\_ACS800\\_2017\\_and\\_onwards\\_rev\\_A.pdf](https://library.e.abb.com/public/2a18100fcfbd4d41a2fe1963141d32f2/Maintenance_schedule_ACS800_2017_and_onwards_rev_A.pdf). [Viitattu 26.02.2019].
- [25] Oh, H. & Han, B. & McCluskey, P & Han, C. & Youn, B. Physics-of-Failure, Condition Monitoring, and Prognostics of Insulated Gate Bipolar Transistor Modules: A Review, *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 30, no. 5, 2015.
- [26] Deshpande, R. *Capacitors*. McGraw-Hill Education, 2015. ISBN 978-0-07-184856-5.
- [27] EPCOS/TDK. Film Capacitors – General technical information. [Verkkodokumentti]. Kesäkuu 2018. Saatavissa: <https://www.tdk-electronics.tdk.com/download/530754/480aeb04c789e45ef5bb9681513474ba/pdf-generaltechnicalinformation.pdf>. [Viitattu 15.04.2019].
- [28] Murata Manufacturing Co., Ltd. What Are Impedance/ESR Frequency Characteristics in Capacitors? [Verkkosivu]. Helmikuu 2013. Saatavissa: <https://www.murata.com/en-eu/products/emiconfun/capacitor/2013/02/14/en-20130214-p1>. [Viitattu 12.07.2019].
- [29] Niiranen, J. *Tehoelektroniikan komponentit*. Helsinki: Otatieto, 2007. ISBN 978-951-672-317-7.
- [30] KEMET Corporation. Introduction to Capacitor Technologies – What is a Capacitor? [Verkkodokumentti]. 2013. Saatavissa: <http://www.kemet.com/Lists/TechnicalArticles/Attachments/6/What%20is%20a%20Capacitor.pdf>. [Viitattu 24.04.2019].
- [31] Wang, H. & Blaabjerg, F. Reliability of Capacitors for DC-Link Applications in Power Electronic Converters – An Overview, *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 50, no. 5, 2014. DOI 10.1109/TIA.2014.2308357.
- [32] Nippon Chemi-Con. Technical Note – Judicious Use of Aluminum Electrolytic Capacitors. [Verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.chemi-con.co.jp/e/catalog/pdf/al-e/al-sepa-e/001-guide/al-technote-e-2018.pdf>. [Viitattu 15.04.2019].
- [33] Cornell Dubilier. Aluminium Electrolytic Capacitor Application Guide. [Verkkodokumentti]. Saatavissa: <http://www.cde.com/resources/catalogs/AEappGUIDE.pdf>. [Viitattu 06.05.2019].
- [34] Nichicon. General Descriptions of Aluminum Electrolytic Capacitors. [Verkkodokumentti]. Saatavissa: <http://www.nichicon.co.jp/english/products/pdf/aluminum.pdf>. [Viitattu 06.05.2019].

- [35] TDK/EPCOS. Aluminum Electrolytic Capacitors – General technical information. [Verkkodokumentti]. Joulukuu 2016. Saatavissa: <https://www.tdk-electronics.tdk.com/download/530704/5f33d2619fa73419e2a4af562122e90c/pdf-generaltechnicalinformation.pdf>. [Viitattu 06.05.2019].
- [36] Ginart, A. *Fault Diagnosis for Robust Inverter Power Drives*. Lontoo: The Institution of Engineering and Technology, 2019. ISBN 978-1-78561-411-8 (PDF).
- [37] Albertsen, A. Electrolytic Capacitor Lifetime Estimation. [Verkkodokumentti]. Jianghai Europe, 2010. Saatavissa: [http://jianghai-america.com/uploads/technology/JIANGHAI\\_Elcap\\_Lifetime\\_-\\_Estimation\\_AAL.pdf](http://jianghai-america.com/uploads/technology/JIANGHAI_Elcap_Lifetime_-_Estimation_AAL.pdf). [Viitattu 14.05.2019].
- [38] Hewitt, D. & Green, J. & Davidson, N. & Foster, M. & Stone, D. Observation of electrolytic capacitor ageing behaviour for the purpose of prognostics, *IECON 2016 - 42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 2016. DOI 10.1109/IECON.2016.7793614.
- [39] Cornell Dubilier. Power Film Capacitor Application Guide. [Verkkodokumentti]. Saatavissa: <http://www.cde.com/resources/catalogs/filmAPPguide.pdf>. [Viitattu 19.06.2019].
- [40] Vishay. General Technical Information: Film Capacitors. [Verkkodokumentti]. Toukokuu 2017. Saatavissa: <https://www.vishay.com/docs/26033/gentechinfofilm.pdf>. [Viitattu 20.06.2019].
- [41] Cornell Dubilier. Design and Testing of Capacitors for Uninterruptable Power Supplies. [Verkkodokumentti]. 2018. Saatavissa: <http://www.cde.com/resources/downloads/Segmented-Film-Capacitor-Paper-6-5-2018.pdf>. [Viitattu 20.06.2019].
- [42] Burger, D. Film Capacitors Robustness & Fail-Safe. [Verkkodokumentti]. Compotec Electronics GmbH. Saatavissa: <http://www.compotec-electronics.com/wordpress/wp-content/uploads/COMPOTEC-Film-Capacitors-Robustness-and-Fail-Safe.pdf>. [Viitattu 19.06.2019].
- [43] Valentine, N & Azarian, M & Pecht, M. Metallized film capacitors used for EMI filtering: A reliability review, *Microelectronics Reliability*, vol. 92, s. 123 - 135, 2019. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2018.11.003>.
- [44] Brown, R. Linking Corrosion and Catastrophic Failure in Low-Power Metallized Polypropylene Capacitors, *IEEE Transactions on Device and Materials Reliability*, vol. 6, no. 2, s. 326 - 333, 2006. DOI 10.1109/TDMR.2006.876612.
- [45] Gallay, R. Metallized Film Capacitor Lifetime Evaluation and Failure Mode Analysis, *Proceedings of the CAS-CERN Accelerator School: Power Converters*,

- toukokuu 2014. Saatavissa: <https://cds.cern.ch/record/2038610/files/45-56-Gallay.pdf>. [Viitattu 18.06.2019].
- [46] Soliman, H. & Wang, H. & Blaabjerg, F. A Review of the Condition Monitoring of Capacitors in Power Electronic Converters, *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 52, no. 6, s. 4976 - 4989, 2016. DOI 10.1109/TIA.2016.2591906.
  - [47] Li, H. & Lewin, P. & Fothergill, J. Aging Mechanisms of X2 Metallized Film Capacitors in a High Temperature and Humidity Environment, *2016 IEEE International Conference on Dielectrics (ICD)*, 2016. DOI 10.1109/ICD.2016.7547738.
  - [48] Chen, Q. & Li, H. & Jiang, H. & Liu, Y. & Zhang, Q. & Lin, F. & Zhang, C. Moisture Ingress of Metallized Film Capacitor under High Temperature and Different Humidity Condition, *2018 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP)*, 2018. DOI 10.1109/CEIDP.2018.8544882.
  - [49] Wu, Y. & Du, X. A VEN Condition Monitoring Method of DC-Link Capacitors for Power Converters, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 66, no. 2, 2019. DOI 10.1109/TIE.2018.2835393.
  - [50] Soliman, H. & Abdelsalam, I & Wang, H. & Blaabjerg, F. Artificial Neural Network based DC-link Capacitance Estimation in a Diode-bridge Front-end Inverter System, *2017 IEEE 3rd International Future Energy Electronics Conference and ECCE Asia (IFEEC 2017 - ECCE Asia)*, 2017. DOI 10.1109/IFEEC.2017.7992442.
  - [51] Sun, P. & Gong, C. & Du, X. & Luo, Q. & Wang, H. & Zhou, L. Online Condition Monitoring for Both IGBT Module and DC-Link Capacitor of Power Converter Based on Short-Circuit Current Simultaneously, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 64, no. 5, 2017. DOI 10.1109/TIE.2017.2652372.
  - [52] Salmi, E. Failure Prevention of Metallized Film Capacitors in Electric Drives. Diplomityö. Aalto-yliopisto, sähkötekniikan korkeakoulu. Espoo. 2016. 82 s.
  - [53] Koppinen, J. & Kukkola, J. & Hinkkanen, M. Plug-In Identification Method for an LCL Filter of a Grid Converter, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 65, no. 8, 2018. DOI 10.1109/TIE.2017.2787546.